

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

6/2015

CONTROL  SCIENCES

Редакционный совет

Акад. РАН С.Н. Васильев, акад. РАН С.В. Емельянов, чл.-корр. РАН И.А. Каляев, акад. РАН В.А. Левин, чл.-корр. РАН Н.А. Махутов, акад. РАН Е.А. Микрин, чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко, чл.-корр. РАН А.Ф. Резчиков, акад. РАН Е.А. Федосов

Редколлегия

Д-ра техн. наук Ф.Т. Алескеров, В.Н. Афанасьев, Н.Н. Бахтадзе, канд. техн. наук Л.П. Боровских (зам. гл. редактора), д-ра техн. наук В.Н. Бурков, В.А. Виттих, В.М. Вишневский, А.А. Дорофеюк, д-р экон. наук В.В. Клочков, д-ра техн. наук С.А. Краснова, О.П. Кузнецов, В.В. Кульба, А.П. Курдюков, д-ра физ.-мат. наук А.Г. Кушнер, А.А. Лазарев, д-р техн. наук В.Г. Лебедев, д-р психол. наук В.Е. Лепский, д-р техн. наук А.С. Мандель, д-р биол. наук А.И. Михальский, чл.-корр. РАН Д.А. Новиков (гл. редактор), д-ра техн. наук Б.В. Павлов, Ф.Ф. Пашенко (зам. гл. редактора), д-р физ.-мат. наук Л.Б. Рапопорт, д-ра техн. наук Е.Я. Рубинович, В.Ю. Рутковский, д-р физ.-мат. наук М.В. Хлебников, д-р техн. наук А.Д. Цвиркун, д-р физ.-мат. наук П.Ю. Чеботарёв, д-р техн. наук И.Б. Ядыкин

Руководители региональных редакционных советов

Владивосток – д-р техн. наук О.В. Абрамов (ИАПУ ДВО РАН)
Волгоград – д-р физ.-мат. наук А.А. Воронин (ВГУ)
Воронеж – д-р техн. наук С.А. Баркалов (ВГАСУ)
Курск – д-р техн. наук С.Г. Емельянов (ЮЗГУ)
Липецк – д-р техн. наук А.К. Погодаев (ЛГТУ)
Пермь – д-р техн. наук В.Ю. Столбов (ПНИПУ)
Ростов-на-Дону – д-р техн. наук Г.А. Угольницкий (ЮФУ)
Самара – д-р техн. наук В.Г. Засканов (СГАУ)
Саратов – д-р техн. наук В.А. Твердохлебов (ИПТМУ РАН)
Уфа – д-р техн. наук Б.Г. Ильясов (УГАТУ)



CONTROL SCIENCES

**Научно-технический
журнал**

6 номеров в год

ISSN 1819-3161

Издается с 2003 года

УЧРЕДИТЕЛЬ

**Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН**

**Главный редактор
чл.-корр. РАН**

Д.А. Новиков

**Заместители главного
редактора**

Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пашенко

Редактор

Т.А. Гладкова

Выпускающий редактор

Л.В. Петракова

Издатель

ООО «Сенсидат-Плюс»

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410.
Тел./факс (495) 334-92-00
E-mail: pu@ipu.ru
Интернет: <http://pu.mtas.ru>

Оригинал-макет
и электронная версия
подготовлены
ИП Прохоров О. В.

Отпечатано в ООО «4 Принт»

Заказ № 185

Подписано в печать
23.11.2015 г.

Журнал зарегистрирован
в Министерстве Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в Перечень ведущих
рецензируемых журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы
основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой
степени доктора и кандидата наук

Подписные индексы:
80508 и **81708** в каталоге Роспечати;
38006 в объединенном каталоге
«Пресса России»

Цена свободная

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

6.2015

СОДЕРЖАНИЕ

Анализ и синтез систем управления

Кожевников А.В., Кочнева Т.Н., Кочнев Н.В. Модальное управление с автонастройкой регулятора в линеаризованных двухмассовых электромеханических системах 2

Управление в социально-экономических системах

Гераськин М.И., Чхартишвили А.Г. Моделирование структур рынка олигополии при нелинейных функциях спроса и издержек агентов . . . 10

Марданов М.Дж., Рзаев Р.Р., Джамалов З.Р., Гасанов В.И. Подход к оценке конкурентоспособности высших учебных заведений 23

Кривошеев О.И. Поиск оптимального кредитного рычага в условиях максимизации ожидаемой скорости роста стоимости портфеля 35

Коротин В.Ю., Ульченков А.М., Исламов Р.Т. Риск-ориентированное управление стоимостью нефтяной компании в условиях неопределенности цен на нефть 46

Соломатин А.Н., Хачатуров В.Р. Методы контроля реализации стратегий регионального развития 53

Управление подвижными объектами и навигация

Соколов Н.Л., Захаров П.А. Информационно-аналитическое обеспечение систем управления космическими аппаратами 62

Информационные технологии в управлении

Будынков А.Н., Масолкин С.И. Проблема выбора ядра в одноклассовом методе опорных векторов 70

Асратян Р.Э. Организация конвейерной программной обработки в мультисерверной сетевой среде 76

* * *

Указатель статей, опубликованных в 2015 г. 82

Contents and abstracts 84

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С АВТОНАСТРОЙКОЙ РЕГУЛЯТОРА В ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ ДВУХМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.В. Кожевников, Т.Н. Кочнева, Н.В. Кочнев

Представлена математическая модель системы управления линеаризованной двухмассовой электромеханической системой с модальным регулятором. Исследованы показатели качества переходных процессов в системе управления, дано их сравнение с характеристиками структуры подчиненного регулирования. Показана высокая эффективность модального управления электроприводами с нежесткой механикой по сравнению с традиционными регуляторами и способами управления. Рассмотрены методы автоматической настройки модального регулятора системы, показана эффективность применения для автонастройки регулятора метода прямого поиска по шаблону по сравнению с генетическими алгоритмами.

Ключевые слова: модальное управление, двухмассовая электромеханическая система, автонастройка регулятора, генетический алгоритм, метод прямого поиска.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из самых эффективных инструментов управления технологическими переменными промышленных установок, непосредственно связанными с качеством и количеством выпускаемой продукции, служат электромеханические системы (ЭМС) — электрические приводы, включающие в себя силовой преобразователь, электродвигатель, механическую передачу и исполнительный орган. Работа ЭМС зачастую сопровождается упругими деформациями, которые вызывают колебания системы, что негативно сказывается на сроке службы оборудования и приводит к росту потерь электроэнергии. Поэтому в современных автоматизированных системах управления должны учитываться эти негативные факторы и в алгоритмах их следует предусматривать работы методы снижения негативных последствий от различных колебаний.

В настоящее время для подавляющего большинства применяемых в промышленности ЭМС характерно использование одноконтурных систем автоматизированного управления с типовыми П,

ПИ, ПИД-регуляторами или систем подчиненного регулирования (СПР) координат. Для инерционных объектов невысокого порядка, характеризующихся отсутствием взаимного влияния координат состояния и выраженных колебательных свойств, такое решение оправдано и позволяет строить системы автоматического управления, отвечающие достаточно высоким технологическим требованиям. Подобные системы пригодны и для более сложных объектов, но при невысоких технических требованиях к качеству процессов управления. Однако применение СПР в системах с нежесткой механикой не всегда дает удовлетворительные результаты.

Существующие системы управления автоматизированными приводами динамических систем не всегда могут обеспечить стабильность технологического процесса [1]. Колебательные процессы имеют случайный характер и, как правило, очень зашумлены, поэтому электромеханические динамические системы в таких случаях должны быть малочувствительными к изменению основных характеристик элементов электропривода (момента

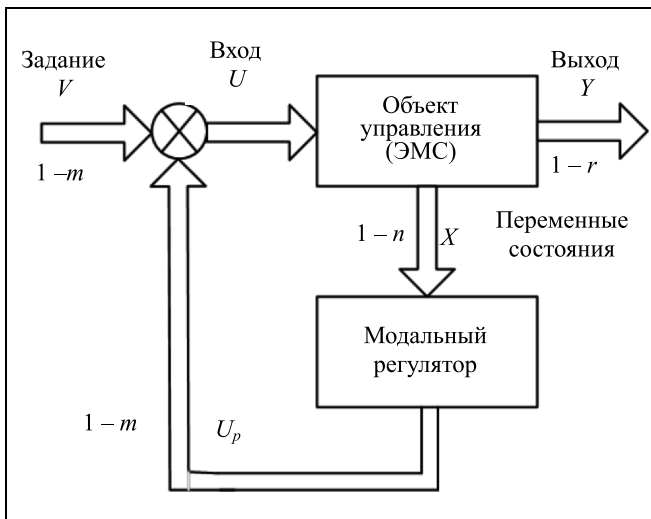


Рис. 1. Схема системы модального управления

инерции, коэффициента жесткости) в достаточно широком диапазоне, определяемом особенностями технологического процесса [1, 2].

Применение модального управления предоставляет разработчику широкие возможности в обеспечении требуемых показателей качества протекания процессов и устойчивости систем управления, поэтому в последние десятилетия вопросам анализа и синтеза систем модального управления уделяется большое внимание, см., например, работы [3–7].

Главные преимущества модального управления: синтезированная система модального управления объектом не требует проверки на устойчивость (так как она заранее должна быть устойчивой и обладать требуемой степенью устойчивости) и введения дополнительных корректирующих устройств (так как она сама уже удовлетворяет требуемым показателям качества).

Общий вид структуры модального управления электромеханической системой приведен на рис. 1, где m — размерность вектора параметров выхода модального регулятора U_p , n — размерность вектора переменных состояния X , r — размерность вектора переменных выхода объекта управления Y , V — вектор сигнала задания.

1. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суть модального управления состоит в определении численных значений коэффициентов передачи безынерционных обратных связей по всем переменным состояниям объекта с целью обеспечения заданного распределения корней характеристического уравнения замкнутой системы автома-

тизированного управления. В зависимости от порядка системы таких коэффициентов может быть достаточно много, что повлечет за собой как сложность и громоздкость формул, так и последующих расчетов, а для высокого порядка системы — невозможность формирования такого аналитического представления, которое можно использовать в расчетах.

Несмотря на свой значительный потенциал, модальный метод проектирования регуляторов в настоящее время нечасто применяются в инженерной практике, поскольку:

- чаще всего реальные объекты нелинейные и в отдельных случаях даже не имеют постоянной структуры, и применение модального метода, изначально предназначенного для синтеза линейных систем, в разработке систем управления такими объектами до сих пор оставалось проблематичным;

- параметры модальных регуляторов (коэффициенты обратной связи) не несут достаточно очевидной смысловой нагрузки и потому при «ухудшении» параметров объекта не могут быть настроены непосредственно разработчиком, как в случае с традиционными регуляторами;

- будучи аналитическим, метод модального синтеза в большей степени, чем классические методы, зависит от точности модели системы.

Применение методов модального управления в решении задач электроприводной техники — сравнительно молодое направление, применение в этой области различных интеллектуальных инструментов встречается довольно редко. Также, несмотря на большое число работ, посвященных модальному синтезу систем управления, не предложено универсальных каких-либо решений в плане частичной или полной автоматизации процесса автоматизации формирования параметров настройки регуляторов без использования аналитических зависимостей.

Для решения подобных задач нужны новые эффективные подходы, можно найти в теории искусственного интеллекта.

2. СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Модальный регулятор преобразует вектор состояния $X(t)$ объекта в вектор управления $U(t)$.

Необходимо найти матрицу коэффициентов K , обеспечивающую желаемые показатели качества замкнутой по вектору состояния системы управления: перерегулирование σ , характеризующее уровень демпфирования системы или степень плав-

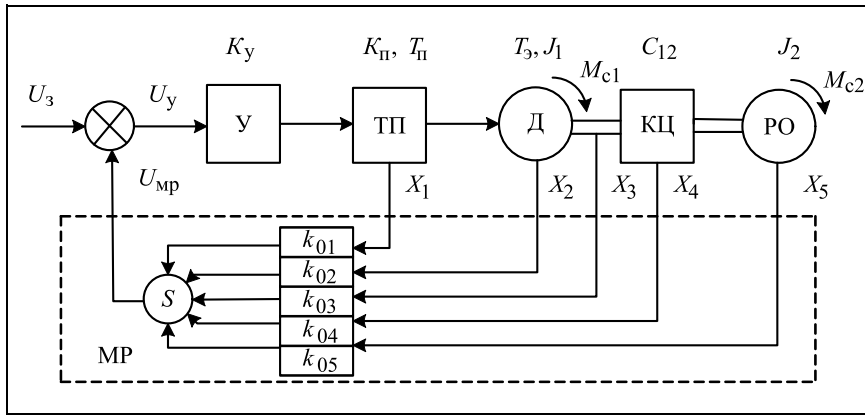


Рис. 2. Функциональная схема двухмассовой ЭМС с модальным регулятором

ности рабочего органа; время переходного процесса $t_{\text{пн}}$, время первого достижения установившегося значения скорости $t_{\text{п}}$, характеризующее быстродействие системы; жесткость β_3 или статизм δ механической характеристики электропривода.

Существует множество типовых нормированных уравнений эталонных моделей. В работе [8] показано, что для модального управления электроприводом лучшей совокупностью характеристик обладают полином Бесселя, стандартные формы, минимизирующие интеграл модуля ошибки, и полином Грехема — Летропа.

В работе [9] разработана математическая модель определения параметров модального регулятора желаемой формы, исследованы показатели качества переходных процессов для рассматриваемого объекта, оценены показатели эффективности применения модальных регуляторов в системах управления электрических приводов.

Выполним синтез модального регулятора для двухмассового электропривода с упругим механическим звеном. Упругое звено с коэффициентом жесткости C_{12} связывает две массы: ротора и рабочего органа с моментами инерции J_1 и J_2 . В подобной системе при определенном соотношении параметров возможен резко колебательный характер движения. Задача управления: обеспечение заданных показателей в статике и динамике, обеспечение устойчивости и стабилизации движения.

Структурная схема двухмассовой электромеханической системы с модальным регулятором приведена на рис. 2.

Основные элементы схемы: усилитель U с коэффициентом усиления K_y ; тиристорный преобразователь $ТП$ с ЭДС $E_{\text{п}}$, коэффициентом усиления $K_{\text{п}}$ и постоянной времени $T_{\text{п}}$; двигатель $Д$ постоянного тока независимого возбуждения с коэффи-

циентом передачи $K_{\text{д}}$, сопротивлением якорной цепи $R_{\text{я}}$, электромагнитной $T_{\text{э}}$ и электромеханической $T_{\text{м}}$ постоянными времени, угловой скоростью ω и моментом трения $M_{\text{с1}}$; модальный регулятор с коэффициентами передачи входов $K_{01} \dots K_{05}$ и сумматором S ; упругое звено кинематическая цепь (КЦ) с коэффициентом жесткости C_{12} ; рабочий орган (РО) с моментом инерции J_2 и моментом сопротивления $M_{\text{с2}}$.

Напряжение управления U_y формируется сравнением напряжения задания U_3 и напряжения $U_{\text{мр}}$ модального регулятора MP .

Структурная схема модели этой системы приведена на рис. 3.

Для анализа воспользуемся системой уравнений, рассмотренной в работе [9]:

$$\begin{aligned} (T_{\text{п}}p + 1)E_{\text{п}} &= K_y K_{\text{п}} U_y, \\ (T_{\text{э}}p + 1)I_{\text{я}} &= (E_{\text{п}} - \omega_1/K_{\text{д}})/R_{\text{я}}, \\ J_1 p \omega_1 &= I_{\text{я}}/K_{\text{д}} - M_{\text{с1}} - M_{12}, \\ M_{12} &= C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2), \\ J_2 p \omega_2 &= M_{12} - M_{\text{с2}}, \\ \omega_1 &= p\varphi_1, \\ \omega_2 &= p\varphi_2. \end{aligned}$$

Здесь M_{12} — упругий момент, ω_1 и φ_1 — угловая скорость и угол поворота двигателя, ω_2 и φ_2 — угловая скорость и угол поворота рабочего органа.

Выбираем переменные состояния:

$$x_1 = E_{\text{п}}, \quad x_2 = I_{\text{я}}, \quad x_3 = \omega_1, \quad x_4 = M_{12}, \quad x_5 = \omega_2.$$

Решая систему уравнений относительно ω_2 , получаем уравнение разомкнутого электропривода:

$$\begin{aligned} (d_0 p^5 + d_1 p^4 + d_2 p^3 + d_3 p^2 + d_4 p + d_5)\omega_2 &= \\ &= K_0 U_y - b_0 M_{\text{с1}}/\beta - (b_1 p^4 + b_2 p^3 + b_3 p^2 + \\ &\quad + b_4 p + b_5)M_{\text{с2}}/\beta, \end{aligned}$$

где $K_0 = K_y K_{\text{п}} K_{\text{д}}$.

Формируем коэффициенты: $d_0 = T_{\text{п}} T_{\text{м}} T_{\text{э}} T_2^2$, $d_1 = (T_{\text{п}} + T_{\text{э}})T_{\text{м}} T_2^2$, $d_2 = T_{\text{м}} T_2^2 + T_{\text{п}}(\gamma T_{\text{э}} T_{\text{м}} + T_2^2)$, $d_3 = T_2^2 + \gamma T_{\text{м}}(T_{\text{п}} + T_{\text{э}})$, $d_4 = \gamma T_{\text{м}} + T_{\text{п}}$, $d_5 = 1$; $b_0 = 1$,

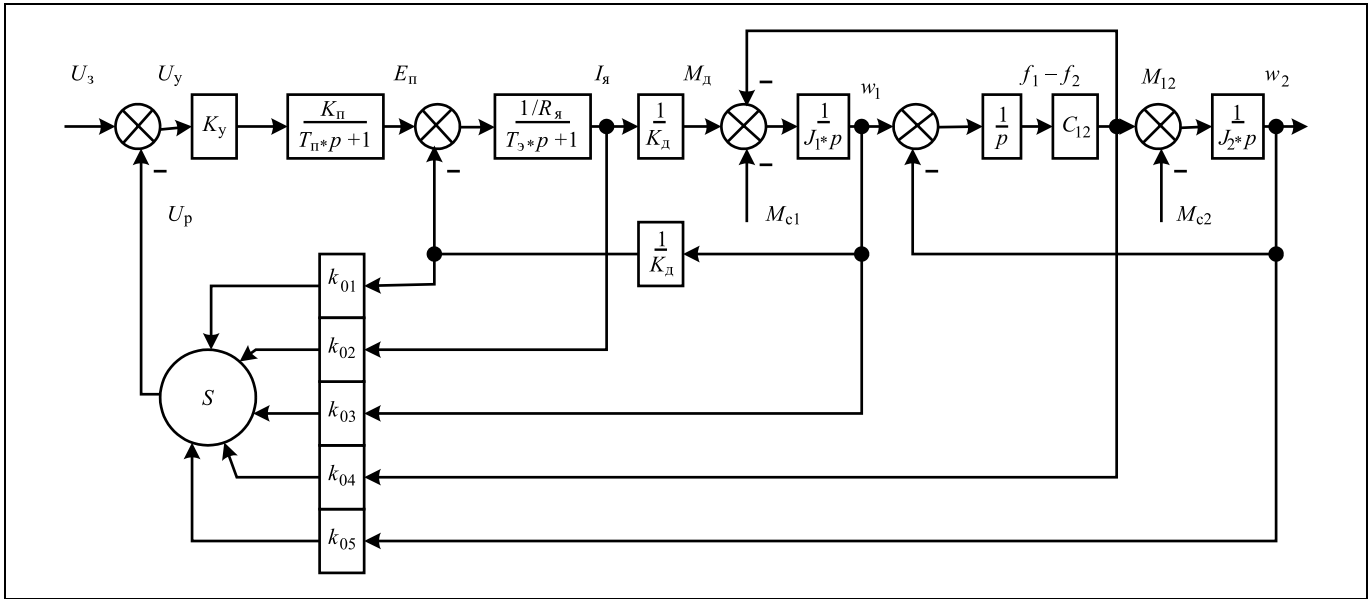


Рис. 3. Структурная схема модели двухмассовой ЭМС с модальным регулятором

$b_1 = T_n T_3 T_1^2$, $b_2 = (T_n + T_3) T_1^2$, $b_3 = T_1^2 + T_n (T_3 + \beta/C_{12})$, $b_4 = T_n + T_3 + \beta/C_{12}$, $b_5 = 1$.

Здесь $T_m = J_1/\beta$ — механическая постоянная времени двигателя; $T_2 = \sqrt{J_2/C_{12}} = 1/\Omega_2$ — резонансная постоянная времени рабочего органа, Ω_2 — его резонансная частота; $T_1 = \sqrt{J_1/C_{12}} = 1/\Omega_1$ — резонансная постоянная времени ротора, Ω_1 — его резонансная частота; $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1$ — коэффициент распределения моментов инерции; β — жесткость механической характеристики разомкнутого электропривода.

Составим уравнение замыкания:

$$U_y = U_3 + \Sigma k_{0i} x_i = U_3 - (k_{01} E_n + k_{02} I_{я} + k_{03} \omega_1 + k_{04} M_{12} + k_{05} \omega_5).$$

Выразив переменные через ω_2 , получим:

$$(D_0 p^5 + D_1 p^4 + D_2 p^3 + D_3 p^2 + D_4 p + D_5) \omega_2 = K_0 U_y - B_0 M_{c1}/\beta - (B_1 p^4 + B_2 p^3 + B_3 p^2 + B_4 p + B_5) M_{c2}/\beta,$$

где коэффициенты $D_0 = d_0$, $D_1 = d_1 + k_1 T_3 T_m T_2^2$, $D_2 = d_2 + (k_1 + k_2) T_2^2$, $D_3 = d_3 + k_1 (\gamma T_3 T_m + T_2^2) + k_3 T_2^2$, $D_4 = d_4 + (k_1 + k_2) \gamma T_m + k_4 (\gamma - 1) T_m + k_3 \beta/C_{12}$, $D_5 = 1 + k_1 + k_3 + k_5$; $B_0 = 1 + k_1 + k_2$, $B_1 = b_1$, $B_2 = b_2 + k_1 T_3 T_1^2$, $B_3 = b_3 + (k_1 + k_2) T_1^2$, $B_4 = b_4 + k_1 (T_3 + \beta/C_{12})$, $B_5 = 1 + k_1 + k_2 + k_4$.

Коэффициенты передачи системы модального управления:

$$k_1 = K_y K_n k_{01}, \quad k_2 = K_y K_n k_{02}/R_{я}, \quad k_3 = K_y K_n K_d k_{03}, \\ k_4 = K_y K_n k_{04}/(R_{я} K_d), \quad k_5 = K_y K_n K_d k_{05}.$$

Далее выбирается нормированное уравнение эталонной модели пятого порядка в форме нормируемого оператора дифференцирования S для замкнутого по обратным связям электропривода по желаемым значениям перерегулирования $\sigma_{жел}$ и времени переходных процессов $t_{пп, жел}$:

$$S^5 + c_1 S^4 + c_2 S^3 + c_3 S^2 + c_4 S + 1 = 0.$$

Находим общие коэффициенты усиления МР при задании базисной частоты ω_6 :

$$k_1 = (d_0 c_1 \omega_6 - d_1)/(T_m T_3 T_2^2), \\ k_2 = (d_0 c_2 \omega_6^2 - d_2)/(T_m T_2^2) - k_1, \\ k_3 = [(d_0 c_3 \omega_6^3 - d_3) - k_1 (\gamma T_m T_3 + T_2^2)]/T_2^2, \\ k_4 = [(d_0 c_4 \omega_6^4 - d_4) - (k_1 + k_2) \gamma T_m]/T_m (\gamma - 1), \\ k_5 = [(d_0 c_5 \omega_6^5 - d_5) - (k_1 + k_3)].$$

При определении коэффициентов k_i желательно выполнение условия $k_i > 0$, что соответствует отрицательным обратным связям и обеспечивает робастность системы (низкую чувствительность к

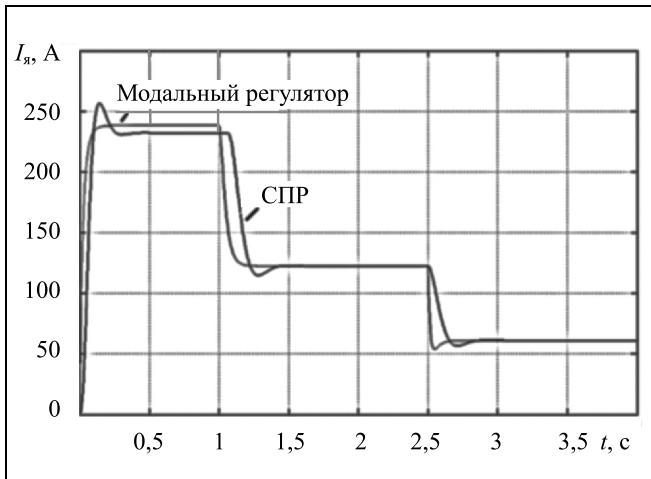


Рис. 4. Графики изменения тока якоря двигателя постоянного тока

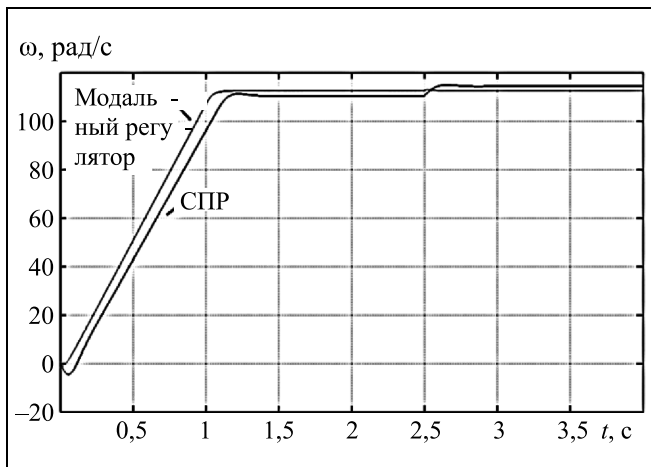


Рис. 5. Графики изменения угловой скорости двигателя постоянного тока

изменениям параметров режима в контурах x_j). При $k_1 \geq 0$ ограничивается значение базисной частоты:

$$\omega_0 \geq d_1/(d_0 c_1) = (1/T_3 + 1/T)_n/c_1.$$

Определяем коэффициенты собственно модального регулятора:

$$\begin{aligned} k_{01} &= k_1/(K_y K_n), \\ k_{02} &= k_2 R_y/(K_y K_n), \\ k_{03} &= k_3/(K_y K_n K_d), \\ k_{04} &= k_4 K_d R_y/(K_y K_n), \\ k_{05} &= k_5/(K_y K_n K_d). \end{aligned}$$

Механическая характеристика замкнутого электропривода:

$$\omega_2 = \frac{K_0 U_3}{1 + k_1 + k_3 + k_5} - \frac{(1 + k_1 + k_2) M_{c1} + (1 + k_1 + k_2 + k_4) M_{c2}}{\beta(1 + k_1 + k_3 + k_5)}.$$

Здесь M_c — момент трения в двигателе и передаче, M_{c2} — момент сопротивления рабочего органа, приведенный к двигателю.

Если пренебречь моментом трения, то жесткость механической характеристики замкнутой системы

$$\beta_3 = \frac{\beta(1 + k_1 + k_3 + k_5)}{1 + k_1 + k_2 + k_4}.$$

Таким образом, выбранные переменные состояния различно воздействуют на жесткость β_3 :

- обратные связи по току и моменту уменьшают жесткость;
- обратные связи по скорости увеличивают жесткость механической характеристики.

Чтобы модальный регулятор повышал жесткость при любой настройке, надо выбрать другой набор переменных состояния, например:

$$\begin{aligned} x_1 &= dI_y/dt; \quad x_2 = \varepsilon_1 = d\omega_1/dt; \quad x_3 = \omega_1; \\ x_4 &= \varepsilon_2 = d\omega_2/dt; \quad x_5 = \omega_2. \end{aligned}$$

В этом случае жесткость увеличится до величины

$$\beta_3 = \beta(1 + k_1 + k_3 + k_5) > \beta.$$

Основные показатели качества переходных режимов определены также для стандартной двухконтурной СПР с контурами регулирования тока и скорости. Моделирование переходных режимов осуществлялось в пакете MATLAB [11].

Проведено исследование процесса управляемого пуска системы с номинальной нагрузкой. В качестве возмущения выбран сброс 50 % нагрузки через 2,5 с. Сравнение графиков изменения параметров режима при управлении и возмущении приведены на рис. 4 и 5.

Результаты сравнения изменения основных параметров при управлении и возмущении (время переходного процесса $t_{\text{пн}}$, перерегулирование σ , статическая ошибка ε и показатель колебательности M) сведены в табл. 1.

Перерегулирование σ характеризует динамическую ошибку начала переходного процесса, а показатель колебательности M — число полных колебаний до достижения установившегося режима.

Таблица 1

Основные показатели качества переходных процессов

Параметр	Система	При управлении				При возмущении			
		$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	$\varepsilon, \%$	M	$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	$\varepsilon, \%$	M
Ток якоря	САУ с МР	0,7	45	0	1,5	0,8	25	0	1,5
	САУ с СПР	1,8	35	0	9	6,0	35	0	12
Скорость w_2	САУ с МР	0,7	0	0	0,5	0,8	5	5	1,5
	САУ с СПР	1,8	5	-5	9	6,0	15	10	12

Сравнение параметров показывает, что САУ ЭМС с модальным управлением по всем показателям существенно превосходит классическую систему подчиненного регулирования: по эффективности сглаживания колебаний и, особенно, по быстродействию: время переходных процессов $t_{пп}$ в контуре тока и скорости уменьшается от 1,8 с до 0,7 с, т. е. в 2,5 раза при реакции на управление, и от 6,0 с до 0,8 с, т. е. в 7,5 раза при реакции на возмущение; показатель колебательности M уменьшается от 9,0 до 1,5, т. е. в 6 раз при реакции на управление, и от 12 до 1,5 с, т. е. в 8 раз при реакции на возмущение. Модальная САУ превосходит также систему с подчиненным регулированием по перерегулированию σ (снижается от 5 % до нуля) и допустимой статической ошибке ε (снижается от 10 % до нуля).

3. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ АВТОНАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Традиционные методы синтеза регуляторов не всегда дают удовлетворительный результат для объектов высокого порядка. В этой связи особое значение приобретают методы синтеза регуляторов, позволяющие сформировать регулятор для объекта сколь угодно высокого порядка.

В связи с повышением возможностей средств вычислительной техники появляется множество различных методов расчета и алгоритмов, достаточно легко реализуемых программно, но в то же время позволяющих быстро и качественно решать задачи, заменяя собой сложные расчеты.

Одними из наиболее перспективных являются методы, основанные на применении методов генетических алгоритмов или прямого поиска по шаблону [10–12].

Рассмотрим применение этих методов для оптимизации автонастройки модальных регуляторов по критерию минимума интеграла ошибки. В этом случае отпадает необходимость в расчетах, система

сформирует требуемые параметры обратных связей автоматически в режиме реального времени.

Идентификация объекта осуществляется по переходной характеристике замкнутой системы управления. Система может работать в режиме предварительной настройки (off-line) и режиме реального времени (on-line).

В САУ (рис. 6) применяется автонастройка модального регулятора электропривода путем формирования матрицы коэффициентов обратных связей K_{oc} при сравнении показателей режимов эталонной модели $X_{эт}$ и объекта управления Y — X и доведении их рассогласования до заданной ошибки регулирования D . Блок настройки выполняет расчет оптимальных параметров K_{oc} согласно заданной структуре объекта в соответствии с принципами модального управления. Блок управления формирует типовой тестовый сигнал U_3 .

Метод прямого поиска представляет собой реализацию двух соответствующих алгоритмов прямого поиска, называемых как обобщенный алго-

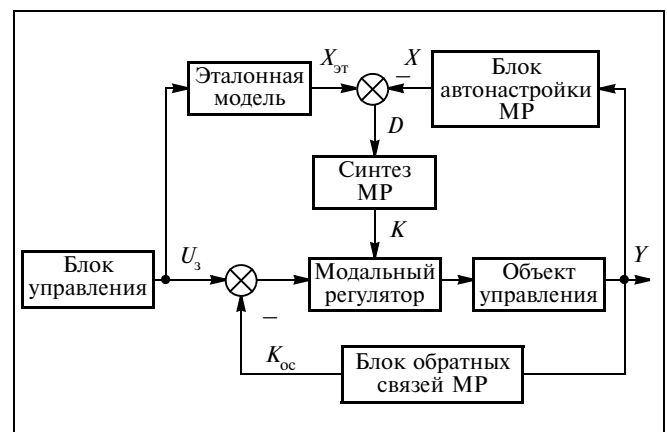


Рис. 6. Схема модального управления с автонастройкой модального регулятора

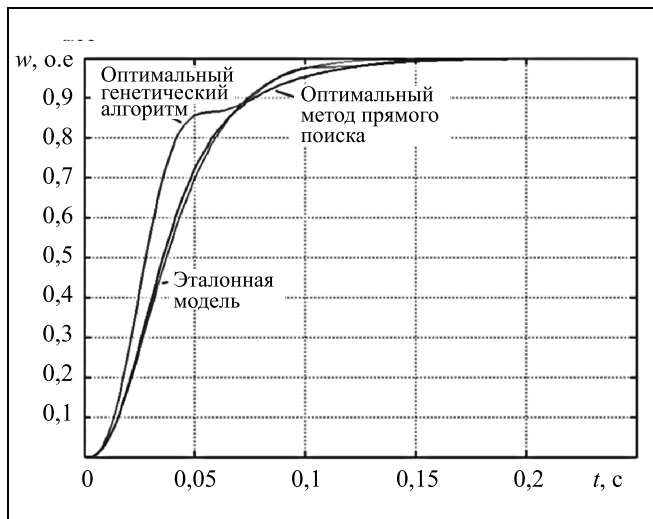


Рис. 7. Графики изменения относительной скорости электромеханической системы при различных вариантах автонастройки модального регулятора

ритм непосредственного поиска (GPS) и как алгоритм сеточного адаптивного поиска (MADS) [11]. На каждом шаге расчета производится поиск некоего набора точек, называемого ячейкой вокруг текущей точки — точки, которая представляет собой результат расчета в зависимости от предыдущего шага выбранного алгоритма. Если данный алгоритм выходит на некую точку в ячейке, в которой отмечается улучшение целевой функции по сравнению с текущей точкой, то новая точка принимает статус текущей точки для последующего шага выбранного алгоритма.

В рамках применения данного метода коэффициенты модального регулятора подбираются не путем сложных расчетов, а автоматически с помощью применения генетического алгоритма или метода прямого поиска.

Рассмотрим процесс пуска двухмассовой электромеханической системы при заданном времени регулирования 0,25 с. Графики изменения относительной угловой скорости ω для эталонной модели и системы управления с автонастройкой модального регулятора приведены на рис. 7.

Оптимизация реализована для биномиальной эталонной модели с минимизацией интеграла модуля ошибки при обеспечении максимального быстродействия САУ.

Параметры режима оптимизации с помощью генетического алгоритма приведены в табл. 2.

Параметры режима оптимизации методом прямого поиска приведены в табл. 3.

В результате моделирования процесс оптимизации с помощью генетического алгоритма для

нахождения/подбора коэффициентов модального регулятора сошелся за 50 итераций при времени вычислений 92,3 с и значении интеграла модуля ошибки 17,4. Процесс оптимизации методом прямого поиска обеспечил сходжение за 25 итераций при времени вычислений 8,6 с и значении интеграла модуля ошибки 4,31.

Таблица 2

Параметры оптимальной настройки генетического алгоритма

Параметр	Алгоритм	Режим настройки	Значение
Тип популяции	Double vector	Объем популяции	20
Исходная функция	Uniform	—	—
Начальная популяция	Initial population	—	[0;1]
Ранжирование	Scaling function	Rank	—
Селекция	Selection	Stochastic uniform	—
Воспроизведение	Elite count Crossover fraction	—	2 0,8
Мутация	Mutation	Gaussian	0,2
Пересечение	Crossover	Intermediate	1,0
Миграция	Forward Interval	—	0,2 20

Таблица 3

Параметры оптимальной настройки алгоритма прямого поиска

Параметр	Алгоритм	Режим настройки	Значение
Метод поиска	GPS Positive Basis 2N	Complete poll	On
Порядок поиска	Random	—	—
Путь поиска	MADS	—	On
Параметры сетки	Accelerator	—	On
Использование констант	Initial penalty	25	20
Использование памяти	Cache	On	On



ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ ВВОДЫ

Разработана математическая модель системы управления линеаризованной двухмассовой электромеханической системы с модальным регулятором в режиме автонастройки.

Показана высокая эффективность модального управления электроприводами с нежесткой механикой по сравнению с традиционными регуляторами и способами управления.

Моделирование в программном пакете MATLAB показали большую эффективность оптимизированной автонастройки модального регулятора методом прямого поиска по сравнению с генетическими алгоритмами.

Полученные результаты дают возможность продолжить исследования, направленные на повышение эффективности управления электромеханическими системами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем* / Под ред. А.А. Колесникова. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. — Ч. III. — 656 с.
2. *Тарарыкин С.В., Тютиков В.В.* Робастное модальное управление динамическими системами // *Автоматика и телемеханика*. — 2002. — № 5. — С. 41–55.
3. *Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В.* Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 216 с.
4. *Кузовков Н.Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства. — М.: Машиностроение, 1976. — 184 с.
5. *Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э.* Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. — 911 с.
6. *Дорф Р., Бишоп Р.* Современные системы управления / Пер. с англ. Б.И. Копылова. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. — 832 с.
7. *Панкратов В.В., Нос О.В.* Специальные разделы теории автоматического управления. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. — Ч. 1. Модальное управление и наблюдатели. — 248 с.
8. *Булындин М.Г.* Исследование эталонных моделей систем модального управления // *Современные научные исследования и инновации*. — 2013. — № 11 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2013/11/28937> (дата обращения: 09.12.2014).
9. *Кочнева Т.Н., Кожевников А.В., Кочнев Н.В.* Синтез модального регулятора и оценка эффективности модального управления для двухмассовых электромеханических систем // *Вестник Череповецкого государственного университета. Научный журнал*. — Череповец: ЧГУ. — 2013. — Т. 2, № 4 (52). — С. 15–22.
10. *Клепиков В.Б., Сергеев С.А., Махотило К.В., Обруч И.В.* Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами // *Электротехника*. — 1999. — № 5. — С. 2–6.
11. *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox User's Guide*. — URL: www.mathworks.com (дата обращения: 19.10.2015).
12. *Кожевников А.В., Волков В.Н.* Разработка функции самонастройки системы управления электроприводом на базе генетического алгоритма // *Автоматизация и современные технологии*. — 2015. — № 2. — С. 41–45.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

Кожевников Александр Вячеславович — канд. техн. наук, зав. кафедрой, ✉ kojevnikovav@chsu.ru,

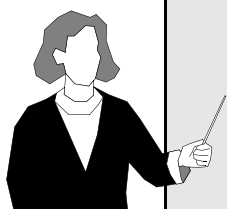
Кочнева Татьяна Николаевна — аспирантка, ✉ elprivod@chsu.ru,

Кочнев Николай Викторович — канд. техн. наук, доцент, ✉ ko4neff.nikolaj@yandex.ru,

Череповецкий государственный университет.

Читайте в ближайших номерах

- ✓ **Байбулатов А.А.** Метод расчета максимального времени модификации программного обеспечения с длительным, итерационным процессом разработки
- ✓ **Буре В.М., Парилина Е.М., Седаков А.А.** Консенсус в социальной сети с двумя центрами влияния
- ✓ **Ведешенков В.А.** Организация диагностирования одиночных неисправных компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами
- ✓ **Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В.М.** Особенности гиросиловой стабилизации собираемой на орбите большой космической конструкции
- ✓ **Клочков В.В., Чернер Н.В.** Повышение эффективности управления производственным потенциалом предприятий в составе интегрированных структур
- ✓ **Кулинич А.А.** Семиотические когнитивные карты. Ч. 1. Когнитивный и семиотический подходы в информатике и управлении
- ✓ **Новиков Д.А.** Кибернетика 2.0
- ✓ **Пляскина Н.И., Харитонов В.Н.** Стратегическое управление и согласование интересов институциональных участников ресурсных мегапроектов



МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР РЫНКА ОЛИГОПОЛИИ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЯХ СПРОСА И ИЗДЕРЖЕК АГЕНТОВ

М.И. Гераськин, А.Г. Чхартишвили

Рассмотрена проблема моделирования структуры олигополистического рынка для произвольного числа агентов, линейных и нелинейных моделей рыночного спроса, нелинейных моделей издержек агентов. Равновесное поведение агентов описано на основе предположительных вариаций в моделях реагирования по Курно или по Штакельбергу (в случае одного или нескольких лидеров). Моделирование равновесий для телекоммуникационного рынка Поволжского региона РФ, для которого путем статистического анализа определены функции цен и издержек агентов на услуги голосовой связи и интернет-коммуникаций, показало адекватность модели реагирования Курно.

Ключевые слова: олигополия, нелинейные модели спроса и издержек, равновесие Нэша, реагирование по Курно, реагирование по Штакельбергу, телекоммуникационный рынок.

ВВЕДЕНИЕ

В экономике современной России отчетливо проявляется тенденция концентрации быстро растущих, локомотивных отраслей третичного сектора высокотехнологичных услуг, наиболее характерная для телекоммуникационного рынка, образованного тремя преобладающими агентами — ОАО «Вымпелком», ОАО «МегаФон», ОАО МТС. Вследствие этой тенденции устанавливаются рыночные структуры олигополистического типа, характерная черта которых состоит в предложении унифицированного товара настолько малым числом продавцов, что вариации действий (объемов предложения) каждого агента существенно влияют на равновесные показатели рынка в целом. Поэтому для рынков олигополии, моделируемых в виде мультиагентных систем с ограниченным числом агентов, в отличие от атомизированных рынков традиционных отраслей, равновесные состояния, сформированные на основе теоретико-игровых моделей, оказываются более адекватными. Актуальной представляется практическая проблема разработки моделей рыночных структур олигополии и последующей их верификации на основе сравнительного анализа с параметрами структур реальных рынков.

Игровая модель олигополии представляет собой совокупность модели рыночного спроса на товары (услуги), продаваемые агентами, моделей издержек агентов, а также моделей реагирования (*reaction functions*) агентов на действия (*actions*), т. е. вариации объемов продаж, конкурентов. В связи с этим точность в смысле приближения к реальной рыночной структуре и, как следствие, сложность модели олигополии определяются, прежде всего, типом функций, моделирующих рыночный спрос и издержки агентов, а также уровнем рефлексии, учитываемым при моделировании реагирования агентов в виде так называемых предположительных вариаций. Предположительная вариация (*conjectural variation*) [1] характеризует предполагаемое агентом ответное изменение объема продаж контрагента (*optimal response*), оптимизирующее критерий последнего при выбранном действии первого. В исследованиях рассмотрены вопросы устойчивости (*consistency*) предположительных вариаций при линейных и нелинейных моделях издержек агентов [2], обоснованы существование и единственность равновесия в предположительных вариациях в классической модели дуополии Курно [3] с постоянными (*consistent*) вариациями, а также в обобщенной модели Курно — Штакельберга [4, 5] с переменными вариациями

при гипотезах о возрастании функций издержек, убывании функции спроса и некоторых других.

Моделирование рыночного спроса и издержек агентов осуществлялось, в основном, для двух-трех агентов на основе линейных функций, причем учитывались: а) исключительно переменные издержки, в частности, исследовались модель ценовой дифференциации двух агентов и двух рынков [6], модель формирования и распада картеля двух агентов [7], модель ценовой дискриминации на рынке двух агентов с кусочно-линейными функциями спроса [8]; б) постоянный и переменный компоненты издержек, а именно, рассматривались модель дискриминационного картеля двух агентов с ограничением на цены предложения агентов [9], а также модель рынка аппаратного и программного обеспечения для трех агентов [10]. Рассматривались также мультиагентные модели с линейной функцией спроса и квадратичными либо линейными функциями издержек агентов: модель с квадратичными функциями издержек агентов рынка инновационных разработок [11], модель с линейными функциями издержек (только переменных) агентов системы нескольких рынков [12], коалиционная модель с квадратичными функциями издержек [13], вертикально интегрированная модель с линейными функциями переменных издержек агентов системы производственного сектора и сектора оптовой торговли [14], динамическая (с интегральными за период критериями) модель с квадратичными функциями переменных издержек агентов туристского рынка с ограничением на темп роста инвестиций [15], модель с линейными функциями переменных издержек и постоянными издержками [16], модель двухпродуктового рынка нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих компаний, издержки которых описывались функциями Кобба — Дугласа [17], модель рынка электроэнергии с квадратичными функциями издержек при ограничениях по мощности [18].

Зарубежные исследования затрагивают теоретико-игровые аспекты функционирования олигополистических рынков без применения методов количественного анализа динамики цен и издержек агентов, базируясь на гипотезах линейных функций спроса и издержек: представлен обзор теоретических основ моделирования олигополии на медиарынке [19]; анализировались модели дуополии при бинарной ценовой дискриминации на рынке интернет-связи [20]; изучались факторы формирования и устойчивости картеля для моделей Курно и Штакельберга телекоммуникационного рынка Франции при постоянных и одинаковых (а также не равных взаимозависимых) предельных издержках агентов [21]; исследованы модели Курно и Штакельберга для рынка элект-

ронных платежей КНР при линейном спросе и линейных издержках агентов [22]; проанализированы модели последовательно формируемых равновесий Курно и Штакельберга для телекоммуникационного рынка КНР при постоянных и различных предельных издержках агентов [23].

Анализ результатов, полученных в этих исследованиях, показывает, что решение задачи моделирования существенно усложняется, прежде всего, в мультиагентных системах, поскольку с ростом числа агентов рынка увеличивается размерность системы условий оптимальности рыночного равновесия, а также число вариантов динамики этой системы в связи с ростом размерности вектора предположительных вариаций, а также в моделях, учитывающих нелинейный характер функций спроса и издержек агентов, для которых возникает система нелинейных условий оптимальности. Поэтому разработка методов моделирования мультиагентной олигополии с учетом нелинейных функций спроса и издержек и формирование алгоритмов выбора равновесных состояний способствуют развитию инструментария моделирования этого рынка.

1. МОДЕЛЬ РЫНКА ОЛИГОПОЛИИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ФУНКЦИЯМИ СПРОСА И ИЗДЕРЖЕК АГЕНТОВ

Предположим, что агенты выбирают оптимальные рыночные стратегии в соответствии с критерием прибыли, получаемой от продажи товаров (услуг), а ограничением служит функция рыночной цены от объема продаж

$$\Pi_i = P(Q)Q_i - C_i(Q_i), \quad Q_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, I, \quad (1)$$

$$P = P(Q), \quad Q = \sum_{i=1}^I Q_i, \quad (2)$$

где Q_i и Π_i — объем продаж и прибыль i -го агента, I — число агентов рынка, P — рыночная цена товара (услуги). Параметрами управления выступают объемы продаж агентов, поскольку согласно неоклассической и кейнсианской теориям при изменении экономической конъюнктуры корректируются не цены, а объемы продаж [24]. В частности, для современных рынков высокотехнологичных услуг смещение точки равновесия по кривой спроса осуществляется не путем снижения цены, а благодаря расширению или сокращению наборов товаров (услуг), вследствие чего варьируется цена.

Рассмотрим линейную и степенную функции рыночных цен

$$P(Q) = a + bQ, \quad a > 0, \quad b < 0, \quad (3)$$

$$P(Q) = AQ^\alpha, \quad A > 0, \quad \alpha < 0, \quad |\alpha| < 1 \quad (4)$$

и степенные функции издержек агентов

$$C_i(Q_i) = C_{Fi} + B_i Q_i^{\beta_i}, \quad C_{Fi} > 0, \quad B_i > 0, \\ 0 < \beta_i < 2, \quad i = 1, \dots, I, \quad (5)$$

где A, α, a, b — коэффициенты регрессий функций цен; B_i, β_i, C_{Fi} — коэффициенты регрессий функций издержек i -го агента. Параметры функций издержек имеют следующий смысл: C_{Fi} — постоянные издержки, B_i — предельные издержки при $\beta_i = 1$, β_i — характеризует эффект расширения масштаба, который может быть положительным ($0 < \beta_i < 1$) или отрицательным ($1 < \beta_i < 2$).

Рассматривается задача определения равновесия Курно — Нэша [25] для рынка с симметричным (одновременным и независимым) принятием решений или равновесия Штакельберга в случае асимметричного рынка с лидером (лидерами). Оптимальные (равновесные) состояния на рынке олигополии традиционно находятся [26] из решения системы необходимых условий оптимальности для задачи (1), (2) при заданном векторе предположительных вариаций:

$$\frac{\partial \Pi_i(Q_i, Q'_i)}{\partial Q_i} = 0, \quad i, j = 1, \dots, I, \quad (6)$$

где Q'_i — предположительная вариация, т. е. предполагаемое изменение объема продаж j -го агента в ответ на единичный прирост продаж i -го агента.

Запишем систему необходимых условий оптимальности (6) для линейной (3)

$$\frac{\partial \Pi_i}{\partial Q_i} = a + bQ + bQ_i \left(1 + \sum_{j=1, j \neq i}^I \frac{\partial Q_j}{\partial Q_i} \right) - B_i \beta_i Q_i^{\beta_i-1} = 0, \\ i = 1, \dots, I, \quad (7)$$

и нелинейной (4) функции спроса

$$\frac{\partial \Pi_i}{\partial Q_i} = A Q^\alpha \left[1 + \alpha \frac{Q_i}{Q} \left(1 + \sum_{j=1, j \neq i}^I \frac{\partial Q_j}{\partial Q_i} \right) \right] - B_i \beta_i Q_i^{\beta_i-1} = 0, \\ i = 1, \dots, I. \quad (8)$$

Поскольку тип равновесия на рынке олигополии зависит [27] от размерности вектора предположительных вариаций, определяемых информационной рефлексией, рассмотрим возможные варианты информированности агентов.

Равновесие Курно. Неиерархическая структура рынка олигополии основана на гипотезе о равноправии агентов, постулирующей, во-первых, однотипность моделей издержек (в классической

постановке Курно, кроме того, постоянные и предельные издержки полагаются одинаковыми для всех агентов); во-вторых, неинформированность всех агентов о действиях окружения, что обуславливает нулевые предположительные вариации $Q'_i = 0$. При этих предположениях формируется равновесие Курно, при котором системы уравнений (7), (8) для всех агентов имеют вид соответственно

$$a + bQ + bQ_i - B_i \beta_i Q_i^{\beta_i-1} = 0, \quad i = 1, \dots, I, \quad (9)$$

$$A Q^\alpha \left[1 + \alpha \frac{Q_i}{Q} \right] - B_i \beta_i Q_i^{\beta_i-1} = 0, \quad i = 1, \dots, I. \quad (10)$$

Системы нелинейных уравнений (6), (7) посредством численного решения позволяют определить вектор объемов продаж агентов рынка при условии, что все агенты одновременно выбирают свои действия, не учитывая выбор других агентов. Заметим, что при постоянных предельных издержках $\beta_i = 1$ из уравнения (9) следует классическое (см. обзор [28]) уравнение линейной реакции Курно

$$Q_i = \frac{a - B_i + bQ_{-i}}{-2b},$$

а частным случаем (10) является уравнение реакции Курно при нелинейном спросе [29]

$$Q_i = \left(A(I + \alpha) / \sum_{i=1}^I B_i \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} - Q_{-i},$$

где Q_{-i} — объем продаж окружения i -го агента. Анализ реакций агентов для этих частных случаев показывает, что с увеличением предельных издержек агента B_i его доля в равновесной рыночной структуре снижается, а из общих уравнений реакций (9), (10) для нелинейных функций издержек, кроме того, следует, что та же тенденция проявляется с увеличением темпа роста издержек β_i .

Неиерархическая структура рынка олигополии, приводящая к состоянию равновесия Курно, может сформироваться как в условиях абсолютных информационных барьеров на рынке, так и вследствие наличия у всех агентов общей информации о невозможности или нецелесообразности изменения равновесия.

Равновесие Штакельберга с одним лидером. Иерархическая модель рынка олигополии адекватна либо при нарушении гипотезы однотипности моделей издержек агентов, например, вследствие существенного отличия параметров функции из-



держек одного из агентов (несопоставимости агентов по масштабу), либо в случае *асимметричной предположительной информированности* на рынке, когда какой-либо агент (*лидер*) полагает, что информирован о действиях окружения. Поскольку для реальных рынков олигополии отклонения параметров функций издержек преобладающих агентов, как правило, незначительны, рассмотрим случай информационного лидерства некоторого k -го агента, информированного о том, что остальные агенты (назовем их *агентами Курно* и обозначим индексом « i ») выбирают действия по реакциям, неявно заданным уравнениями (9), (10). При этом формируется классическое равновесие Штакельберга, для определения которого дифференцированием уравнений (9), (10) как неявных функций $Q_i(Q_k)$, $k \neq i$, найдем предположительные вариации для линейной и нелинейной функций спроса соответственно

$$\frac{\partial Q_i}{\partial Q_k} = -\frac{b}{U_i}, \quad i = 1, \dots, I, \quad k \neq i, \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial Q_k} = \frac{F_i}{u_i - F_i}, \quad i = 1, \dots, I, \quad k \neq i, \quad (12)$$

где $U_i = U_i(Q_i) = 2b - u_i$, $u_i = u_i(Q_i) = B_i \beta_i (\beta_i - 1) Q_i^{\beta_i - 2}$,

$$F_i = F_i(Q, Q_i) = A \alpha Q^{\alpha - 1} \left(1 + (\alpha - 1) \frac{Q_i}{Q} \right).$$

Для частного случая линейных функций издержек ($\beta_i = 1$) из формулы (11) следуют постоянные предположительные вариации агентов Курно для линейной функции спроса $Q'_{iQ_k} = -1/2$ [28], а из формулы (12) можно получить также постоянные предположительные вариации для степенной функции спроса $Q'_{iQ_k} = -1$ [29]. В общем случае формулы (11), (12) задают переменные предположительные вариации, как правило, отрицательные ($Q'_{iQ_k}(Q_i) < 0$), за исключением случая преобладающей доли на рынке какого-либо агента с положительным эффектом расширения масштаба¹. Проанализируем функции $Q'_{iQ_k}(Q_i)$ по абсолют-

ной величине: для линейного спроса функция U_i , как правило, отрицательна² и с увеличением рыночной доли i -го агента модуль функции $Q'_{iQ_k}(Q_i)$, как следует из формулы (11), возрастает при отрицательном эффекте масштаба и убывает в противном случае; для степенного спроса функция F_i , как правило, отрицательна³, поэтому с ростом Q_i при отрицательном эффекте масштаба функция $u_i > 0 \forall \beta_i > 1$ убывает, значит из формулы (12) следует возрастание модуля функции $Q'_{iQ_k}(Q_i)$, а при положительном эффекте масштаба ($u_i < 0 \forall \beta_i < 1$) — наоборот. Следовательно, при нелинейных функциях издержек увеличение доли агента в рыночной структуре приводит к изменению вектора предположительных вариаций и, в результате, к перераспределению рынка в пользу агентов с положительным эффектом масштаба.

Подставив вариации (11), (12) в системы необходимых условий оптимальности (7), (8), получим уравнения оптимальных реакций для лидера по Штакельбергу при линейной и степенной функциях спроса:

$$a + bQ + bQ_k \left(1 - b \sum_{i=1, i \neq k}^I \frac{1}{U_i} \right) - B_k \beta_k Q_k^{\beta_k - 1} = 0, \quad (13)$$

$$A Q^{\alpha} \left[1 + \alpha \frac{Q_k}{Q} \left(1 + \sum_{i=1, i \neq k}^I \frac{F_i}{u_i - F_i} \right) \right] - B_k \beta_k Q_k^{\beta_k - 1} = 0, \quad (14)$$

а условия оптимальности остальных агентов, реагирующих по Курно, имеют вид (9), (10). Систему уравнений (13), (14) также можно решить численно, причем лидерами являются либо последовательно все агенты рынка, либо, в целях упрощения процедуры анализа, исследуются только агенты, имеющие преобладающие доли рынка в ретроспективном периоде, априори предполагая, что более «сильные» агенты в равновесии опережают других в распределении рынка.

¹ Для линейного спроса $Q'_{iQ_k}(Q_i) > 0$ следует из условия $U_i > 0 \forall [\beta_i < 1 \cap 2|b| < B_i \beta_i |\beta_i - 1| Q_i^{\beta_i - 2}]$; для степенной функции спроса $Q'_{iQ_k}(Q_i) > 0$ может быть только при $F_i < 0 \cap u_i < 0 \cap |u_i| > |F_i|$, что приводит к аналогичному по смыслу соотношению $B_i \beta_i |\beta_i - 1| Q_i^{\beta_i - 2} > A |\alpha| Q^{\alpha - 1} (1 + (\alpha - 1) Q_i/Q)$.

² Для типичных рынков $U_i < 0 \forall \beta_i > 1 \cup [\beta_i < 1 \cap 2|b| < B_i \beta_i |\beta_i - 1| Q_i^{\beta_i - 2}]$.

³ Для типичных рынков кривая спроса имеет низкую эластичность ($|\alpha| < 1$), а $F_i > 0$ может быть при условии $\alpha < 1 - Q_i/Q$, что при $Q \gg Q_i$ выполнено только для высокоэластичного спроса.

В частном случае линейных издержек ($\beta_i = 1$) из уравнения (13) следует уравнение реакции лидера по Штакельбергу для линейного спроса

$$Q_k = \frac{a - B_k + bQ_{-k}}{-2b + b(I-1)/2},$$

а из уравнения (14) приближенно (полагая $I \gg 1$) можно выразить реакцию лидера для степенной функции спроса

$$Q_k = \left(AI / \sum_{i=1}^I B_i \right)^{1/(1-\alpha)} - Q_{-k}.$$

Сравнив реакции лидеров по Штакельбергу с уравнениями реакций агентов Курно для представленных частных случаев, отметим тенденцию к асимметрии рыночной структуры в пользу лидера; аналогичный вывод следует из сравнительного анализа реакций (9), (10) с реакциями (13), (14) соответственно.

Равновесие с лидером по Штакельбергу может устанавливаться при наличии системных взаимозависимостей агентов, в частности, в случае имущественной интеграции в форме образования холдинговой структуры с дочерними (зависимыми) организациями, в которой преобладающий на рынке агент выступает в роли собственника капиталов остальных агентов. Равновесие с одним лидером служит основой для разработки моделей равновесия при нескольких лидерах.

Равновесие Штакельберга с несколькими лидерами. Рассмотрим иерархическую модель рынка олигополии, в которой, по аналогии с предыдущим случаем, имеет место асимметричная предположительная информированность, но не один, а несколько агентов-лидеров (обозначены индексом « k ») информированы о том, что остальные агенты (обозначены индексом « i ») выбирают действия по реакциям Курно (9), (10). Возникающая в результате рыночная структура определяется тем, какая из следующих моделей информационного взаимодействия реализуется на верхнем уровне иерархии.

Прежде всего, *классическая модель Штакельберга*, в которой не предполагается взаимное реагирование лидеров, т. е. по отношению друг к другу лидеры являются агентами Курно. При этом реагирование агентов Курно на нижнем уровне (назовем его нулевым уровнем и обозначим число соответствующих агентов I_0) описывается системами уравнений (9), (10), в которых положим $i = 1, \dots, I_0$. Реагирование лидеров, относящихся к высшему (первому) уровню иерархии на действия агентов

нулевого уровня описывается системами уравнений, аналогичными уравнениям (13), (14), в которых полагается $k = 1, \dots, I_1$, где I_1 — число агентов-лидеров первого уровня.

Далее, *модель Штакельберга с информационной рефлексией лидеров*: предполагается, что из множества агентов-лидеров выделяются агенты-лидеры второго уровня (обозначим число соответствующих агентов I_2), информированные о том, что остальные $I_1 = I - I_2 - I_0$ лидеров выбирают действия по неявно заданным реакциям (13), (14) лидеров первого уровня. Проиндексируем лидеров второго уровня символом « m », $m = 1, \dots, I_2$, а индексом « k », $k = 1, \dots, I_1$, как ранее, будем также обозначать лидеров первого уровня. Так формируется двухуровневая модель Штакельберга, в которой множество агентов есть сумма трех подмножеств $I = I_0 + I_1 + I_2$. Выведем уравнение реакции m -го лидера второго уровня на действия k -го лидера первого уровня, считая, что уравнения (13), (14) как неявные функции $Q_k(Q_m)$, $k \neq m$, определяют предположительные вариации действий k -го лидера, исходя из имеющейся у m -го лидера информации:

$$\frac{\partial Q_k}{\partial Q_m} = \frac{b \left(b Q_k \frac{W_m}{U_m^2} - 1 \right)}{U_k - b^2 \sum_{j=1, j \neq k}^{I_0} \frac{1}{U_j}}, \quad k = 1, \dots, I_1,$$

$$m = 1, \dots, I_2, \quad k \neq m, \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial Q_m} = - \frac{F_k + A\alpha Q^{\alpha-2} Q_k \left[\Sigma_1 + Q \frac{F'_m Q_m u_m - W_m F_m}{(u_m - F_m)^2} \right]}{F_k [1 + \Sigma_1] - A\alpha Q^{\alpha-1} [1 + Q_k \Sigma_2] - W_k},$$

$$k = 1, \dots, I_1, \quad m = 1, \dots, I_2, \quad k \neq m, \quad (16)$$

где

$$W_m = W_m(Q_m) = u'_m Q_m = B_m \beta_m (\beta_m - 1) (\beta_m - 2) Q_m^{\beta_m - 3},$$

$$F'_m Q_m = F'_m(Q, Q_m) = A\alpha(\alpha - 1) Q^{\alpha-2} (2 + (\alpha - 2) Q_m / Q), \quad \Sigma_1 = \Sigma_1(F_j, u_j) = \sum_{j=1, j \neq k}^I \frac{F_j}{u_j - F_j},$$

$$F'_i Q_k = F'_i(Q, Q_i) = A\alpha(\alpha - 1) Q^{\alpha-2} (1 + (\alpha - 2) Q_i / Q),$$

$$\Sigma_2 = \Sigma_2(F_j, u_j) = \sum_{j=1, j \neq k}^I \frac{F'_j Q_k u_j}{[u_j - F_j]^2}.$$



Отметим, что для линейных функций издержек ($\beta_k = \beta_m = 1$) из выражения (15) следует, что предположительная вариация постоянна и равна значению, полученному из уравнения (9) для агентов Курно при линейном спросе ($Q'_{kQ_m} = -1/2$), а из выражения (16) также следует постоянная предположительная вариация, найденная из уравнения (10) для агентов Курно при степенной функции спроса ($Q'_{kQ_m} = -1$). Поэтому при линейных издержках уравнение реакции m -го лидера второго уровня на действия k -го лидера первого уровня будет идентично уравнениям (13), (14), т. е. образующееся в результате равновесие соответствует классической модели Штакельберга. Следовательно, наличие нелинейных функций издержек служит фактором, обуславливающим специфичность модели Штакельберга с информационной рефлексией лидеров.

Уравнения оптимальных реакций (7), (8) для лидеров второго уровня имеют вид:

$$a + bQ + bQ_m \left(1 - b \sum_{k=1, k \neq m, j}^{I_1} \frac{bQ_m \frac{W_k}{U_k^2} - 1}{U_m - b^2 \sum_{j=1, j \neq k, m}^{I_0} \frac{1}{U_j}} \right) - B_m \beta_m Q_m^{\beta_m - 1} = 0, \quad m = 1, \dots, I_2, \quad (17)$$

$$AQ^\alpha \left[1 + \alpha \frac{Q_m}{Q} \left(1 - \sum_{k=1, k \neq m}^I \frac{F_k + A\alpha Q^{\alpha-2} Q_k \left[\Sigma_1 + Q \frac{F'_m Q_m u_m - W_m F_m}{(u_m - F_m)^2} \right]}{F_k [1 + \Sigma_1] - A\alpha Q^{\alpha-1} [1 + Q_k \Sigma_2] - W_k} \right) \right] - B_m \beta_m Q_m^{\beta_m - 1} = 0, \quad m = 1, \dots, I_2, \quad (18)$$

где суммирование по индексу k соответствует агентам-лидерам первого уровня. Сопоставление реакций (17), (18) лидеров второго уровня с аналогичными соотношениями для лидеров первого уровня (13), (14) показывает усиление асимметрии структуры рынка в пользу лидеров более высокого уровня.

Таким образом, равновесное распределение рынка при тех уровнях иерархии определяется из решения систем уравнений (9), (10) для агентов Курно нулевого уровня (полагая $i = 1, \dots, I_0$), сис-

тем уравнений (13), (14) для лидеров первого уровня (полагая $k = 1, \dots, I_1$) и уравнений (17), (18) для лидеров второго уровня, соответственно заданной функции рыночного спроса. Фактором формирования рыночной системы, в которой каждый агент стремится играть роль лидера, могут стать несогласованные представления агентов об их взаимной рыночной силе.

На рис. 1 представлены информационные взаимодействия и формирующиеся в результате реакции для моделей Штакельберга с одним или несколькими лидерами. Уровни информационной рефлексии $I_0, I_1, \dots, I_N$ (соответствующие уровням лидеров), изображены в пунктирных блоках, агенты (обозначены символами A_j) взаимодействуют по описанным выше реакциям (изображены в оvals), которые обозначены следующим образом: RK — реакции Курно, определяемые системами уравнений (9), (10); $RS_0, RS_2, \dots, RS_{N-2}, RS_N$ — реакции лидеров первого и последующих уровней на действия агентов низших уровней, соответствующие системам уравнений (13), (14); $RS_1, \dots, RS_{N-1}$ — реакции лидеров первого и последующих уровней на действия лидеров того же уровня, определяемые системами уравнений (17), (18). Наивысший (N -й) уровень интерпретируется аналогично единственному лидеру в классической модели Штакельберга, реакция которого на действия остальных агентов определена уравнениями (13), (14); второй уровень информированности I_2 совмещен с уровнем I_{N-1} .

Отметим, что, несмотря на внешнее сходство уровней лидерства с коалициями, внутри множеств агентов на каждом уровне в рассматриваемой модели не предполагается кооперации, поскольку отсутствует информационный обмен, информированность является только предполагаемой и структуры рынка формируются на основе некооперативного равновесия Нэша.

Системы уравнений реакций получены для модели Штакельберга с информационной рефлексией лидеров до второго уровня включительно; для агентов с более высоким уровнем рефлексии реакции могут быть получены аналогично методике вывода уравнений (17), (18). Однако для решения практических задач верификации структур рынков олигополии это нецелесообразно поскольку на рынке олигополии, как правило, действует малое число агентов, (3—5 на реальных рынках), и для развития механизмов рефлексивного поведения необходимо наличие окружения [30], т. е. на каждом уровне должно быть несколько агентов. Поскольку N теоретически (предполагая наличие хотя

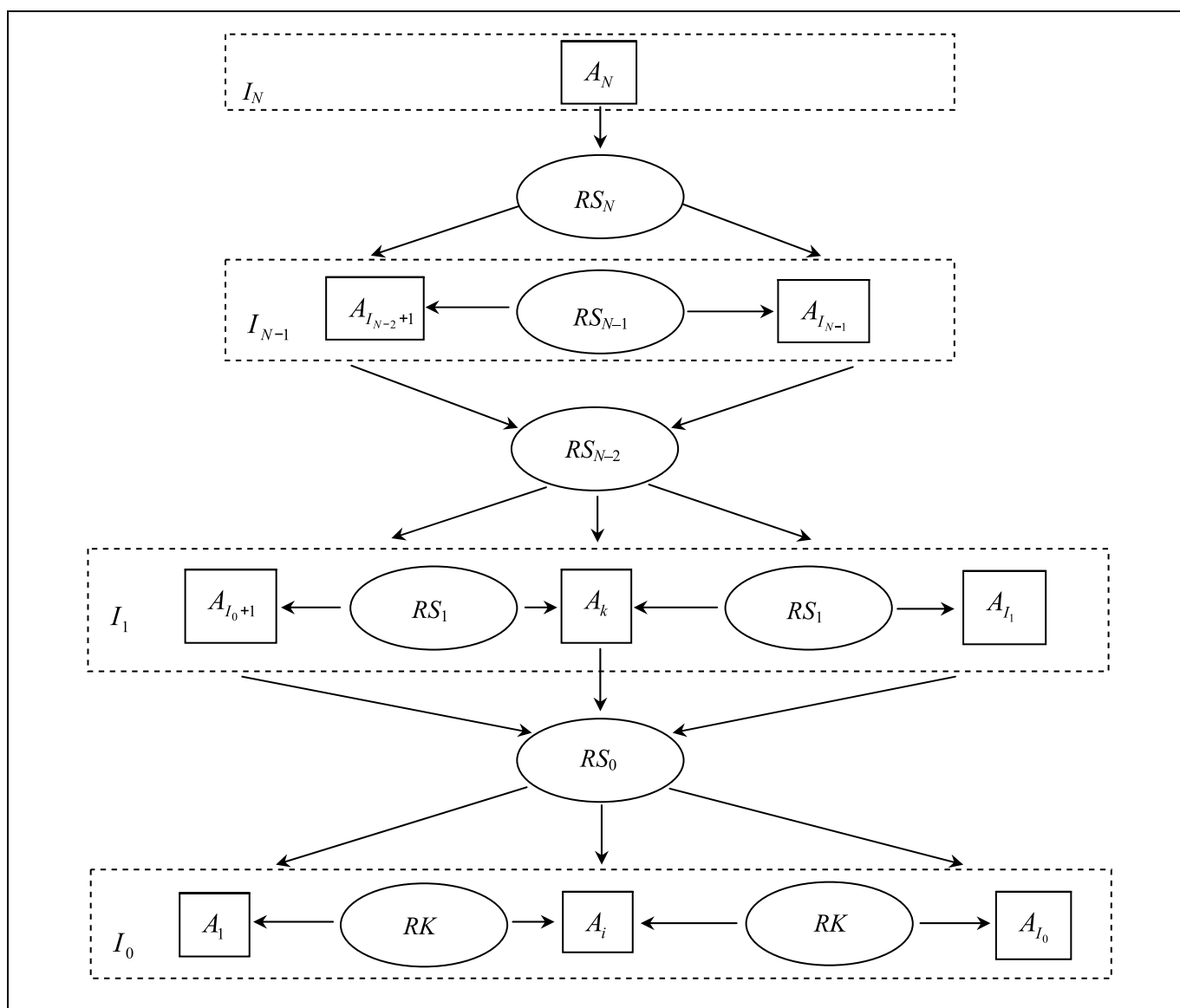


Рис. 1. Схема информационных уровней взаимодействий агентов

бы одного агента на каждом уровне) не может быть больше числа агентов рынка, то на практике глубина рефлексии должна быть существенно меньше ($N \ll I$).

2. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЫНКА И ИЗДЕРЖЕК АГЕНТОВ

Примером одной из типичных динамично растущих отраслей экономики в первые десятилетия XXI в. служит телекоммуникационный рынок Российской Федерации, который интенсивно развивается, значительно опережая по темпам роста

другие отрасли экономики. Ежегодный темп роста суммарной абонентской базы операторов рынка [31–34], снизившийся с 70–150 % в 2002–2008 гг. до 2–5 % в 2010–2013 гг., сопровождался стабилизацией темпов роста объемов голосовых услуг на уровне 105–160 % в 2008–2013 гг., демонстрируя тенденцию интенсификации рынка. Тенденция диверсификации рынка проявлялась в структурных изменениях доходов операторов: сокращение доли выручки от голосовых услуг с 76 до 63 % и от передачи сообщений с 7 до 3 % в 2004–2013 гг. сопровождалось ростом доли выручки от интернет-передачи данных с 3 до 19 %.

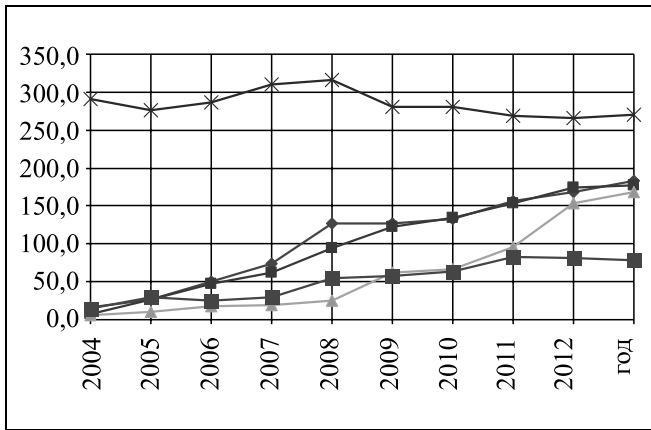


Рис. 2. Динамика голосового трафика операторов рынка мобильной связи России (млрд мин) и индекса Херфиндала — Хиршмана в 2004—2013 гг.: —♦— МТС; —▲— МегаФон; —*— ННН*0,1; —■— «Вымпелком»; —■— другие операторы

Процессы структурирования рынка адекватно отражает индекс Херфиндала — Хиршмана (ННН), определяемый в виде суммы квадратов рыночных долей агентов рынка [35]. Тенденция концентрации рынка, наблюдавшаяся в 2004—2008 гг. исходя из динамики роста ННН (рис. 2) с 2900 до 3150, сменилась стабилизацией индекса в 2009—2013 гг. в диапазоне 2700—2800, характеризуя рынок как устойчивый высоконцентрированный, олигополистический. Телекоммуникационный рынок сформирован взаимодействием трех основных агентов — операторов сотовой связи федерального уровня ОАО «Вымпелком», ОАО «МегаФон», ОАО МТС — занимающих в 2013 г. свыше 80 % рынка; остальную долю занимают региональные операторы, в частности, в дальнейшем будет исследоваться рынок Поволжского региона, на котором преобладает ОАО СМАРТС.

Исследуем динамику цен на телекоммуникационные услуги и показателей издержек агентов рынка в предположении о наличии устойчивых трендов, которые в дальнейшем будем использовать как статические параметры модели рынка. Статистический анализ динамических рядов средневзвешенных цен (на рис. 3 показаны цены в соответствующем году) голосовых услуг P^g (за 1 мин) и интернет-трафика $P^и$ (за 1 Мб), рассчитанных по формулам

$$P^g = \frac{\sum_{i=1}^4 P_i^g Q_i^g}{\sum_{i=1}^4 Q_i^g}, \quad P^и = \frac{\sum_{i=1}^4 P_i^и Q_i^и}{\sum_{i=1}^4 Q_i^и}, \quad (19)$$

показал наличие на рынке РФ степенных и линейных функций цен в различных диапазонах объемов услуг, поэтому определим регрессии в кусочно-заданном виде:

$$\hat{P}^g = \begin{cases} A^g (Q^g)^{\alpha^g}, & Q^g \leq \tilde{Q}^g, \\ a^g + b^g Q^g, & Q^g > \tilde{Q}^g, \end{cases}$$

$$\hat{P}^и = \begin{cases} A^и (Q^и)^{\alpha^и}, & Q^и \leq \tilde{Q}^и, \\ a^и + b^и Q^и, & Q^и > \tilde{Q}^и, \end{cases} \quad (20)$$

где P_i^g и $P_i^и$ — цены голосовых услуг и интернет-трафика i -го агента; $A^g, \alpha^g, a^g, b^g, A^и, \alpha^и, a^и, b^и$ — коэффициенты регрессионных функций аппроксимации спроса; $\tilde{Q}^g, \tilde{Q}^и$ — значения показателей, соответствующие изменению тенденций (млрд. мин, млн. Мб), произошедшему в 2009 г. и выразившемуся в виде резкого роста объемных показателей агентов (на рис. 3 ценовые тренды имеют соответствующие разрывы); Q_i^g и $Q_i^и$ — объемы голосовых услуг и интернет-трафика i -го агента за соответствующий период. Введем индексацию агентов рынка: 1 — ОАО МТС, 2 — ОАО «Вымпелком», 3 — ОАО «МегаФон», 4 — ОАО СМАРТС.

Оценка коэффициентов регрессий (20) по временным рядам цен (19) алгоритмом метода наименьших квадратов, реализованным в процес-

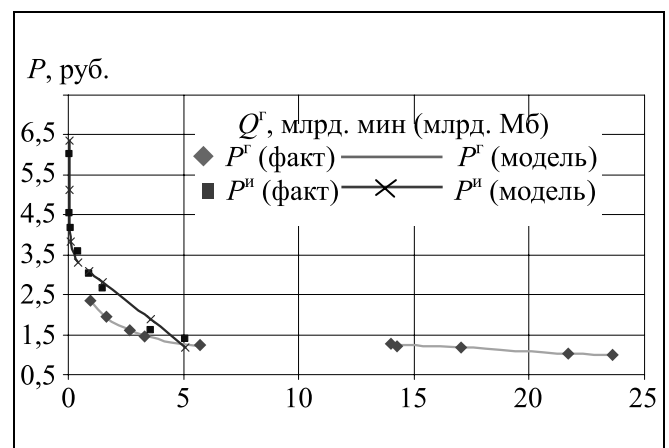


Рис. 3. Фактические ряды цен голосового и интернет-трафика агентов рынка Поволжского региона РФ в 2004—2013 гг. и регрессионные модели

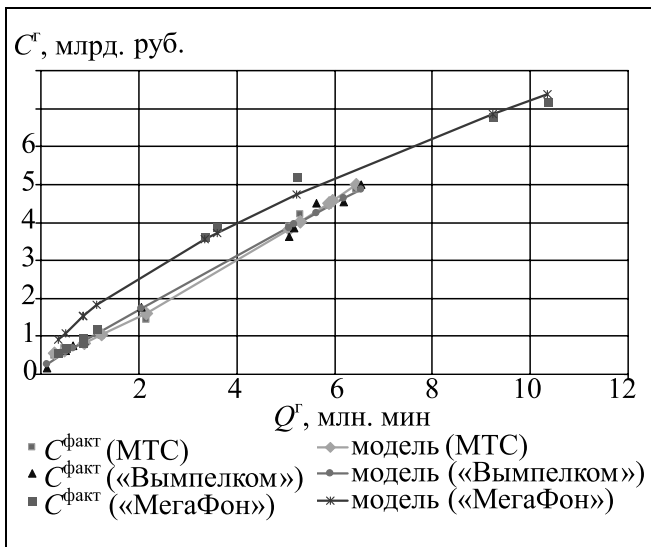


Рис. 4. Фактические зависимости и регрессионные модели издержек на предоставление голосовых услуг агентов рынка Поволжья в 2004–2013 гг.

соре MS Excel, показала следующие регрессии (см. рис. 3):

$$\hat{p}^r = \begin{cases} 2,312(Q^r)^{-0,366}, & Q^r \leq 5,71, \\ 1,623 - 0,027 Q^r, & Q^r > 5,71, \end{cases}$$

$$\hat{p}^n = \begin{cases} 34,96(Q^n)^{-0,504}, & Q^n \leq 81,2, \\ 3,507 - 0,0005 Q^n, & Q^n > 81,2. \end{cases} \quad (21)$$

Анализ регрессий показывает *линейный характер ценовой динамики рынка* в 2009–2013 гг., а анализ статистических оценок регрессий подтверждает высокие объясняющие характеристики сформированных моделей, их адекватность связи между результирующими показателями и факторами (коэффициент детерминации превышает значение 0,97), их статистическую значимость (критерий Фишера превышает критический уровень).

Определим модели издержек агентов рынка на основе статистического анализа (рис. 3, 4) динамических рядов издержек агентов рынка в Поволжском регионе РФ, сформировав регрессии в виде степенных функций:

$$\hat{C}_i^r(Q) = C_{Fi}^r + B_i^r (Q_i^r)^{\beta_i^r},$$

$$\hat{C}_i^n(Q) = C_{Fi}^n + B_i^n (Q_i^n)^{\beta_i^n}, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (22)$$

где $C_i^r(Q)$, $C_i^n(Q)$ — издержки на голосовые услуги и на интернет-передачу i -го агента рынка;

C_{Fi}^r , C_{Fi}^n — постоянные издержки на голосовые услуги и на интернет-передачу i -го агента рынка; B_i^r , B_i^n , β_i^r , β_i^n — коэффициенты регрессий издержек. По моделям (22) сформированы регрессии (рис. 4, 5):

$$\begin{cases} \hat{C}_1^r(Q) = 0,5 + 0,4(Q_1^r)^{1,29}, \\ \hat{C}_2^r(Q) = 0,17 + 0,79(Q_2^r)^{0,95}, \\ \hat{C}_3^r(Q) = 0,1 + 1,6(Q_3^r)^{0,65}, \\ \hat{C}_4^r(Q) = 0,2 + 1,85(Q_4^r)^{2,13}, \\ \hat{C}_1^n(Q) = 22,2 + 23,7(Q_1^n)^{0,56}, \\ \hat{C}_2^n(Q) = 7,46 + 19,25(Q_2^n)^{0,6}, \\ \hat{C}_3^n(Q) = 24,83 + 49,27(Q_3^n)^{0,48}, \\ \hat{C}_4^n(Q) = 20,79 + 11,67(Q_4^n)^{0,6}. \end{cases} \quad (23)$$

Анализ статистических оценок регрессий подтверждает адекватность и статистическую значимость моделей, так как значения коэффициента детерминации превышают уровень 0,97 (кроме значения для C_4^r , равного 0,92), критерий Фишера превышает критический уровень не менее чем в 40 раз (для C_4^r в 16 раз). Анализ регрессионных моделей издержек показывает незначительное влияние постоянных издержек (менее 5 % от издержек на голосовые услуги, менее 1 % от издержек на интернет-трафик) и позволяет выявить

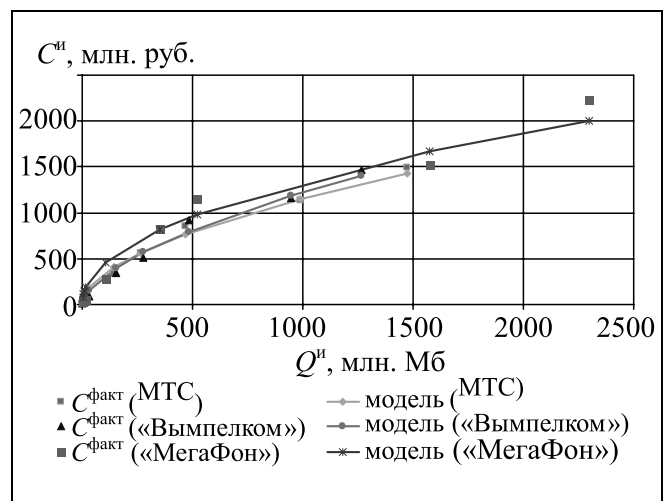


Рис. 5. Фактические зависимости и регрессионные модели издержек на предоставление услуг интернет-связи агентов рынка Поволжья в 2004–2013 гг.

отрицательный эффект расширения масштаба для моделей издержек агентов 2 и 3 на голосовые услуги и *положительный эффект* — для моделей издержек на интернет-трафик всех агентов и издержек агентов 1 и 4 на голосовые услуги.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАВНОВЕСИЙ

Для выбора наиболее адекватного реальным рыночным условиям равновесия воспользуемся критериями: относительным отклонением от фактических значений равновесной рыночной цены $\Delta \bar{P}$, равновесным объемом рынка $\Delta \bar{Q}$ и рыночных долей $\Delta \bar{Q}_i$, отклонением совокупной прибыли агентов $\Delta \bar{\Pi}$:

$$\begin{aligned}\Omega_1 &= \min_{P^r, P^u} \max \Delta \bar{P} = \frac{|P^* - P^{\text{факт}}|}{P^{\text{факт}}}, \\ \Omega_2 &= \min_{Q^r, Q^u} \max \Delta \bar{Q} = \frac{|Q^* - Q^{\text{факт}}|}{Q^{\text{факт}}}, \\ \Omega_3 &= \min_{\Pi^r, \Pi^u} \max \Delta \bar{\Pi} = \frac{|\Pi^* - \Pi^{\text{факт}}|}{\Pi^{\text{факт}}}, \\ \Omega_4 &= \min_{Q_i^r, Q_i^u} \max \Delta \bar{Q}_i = \frac{|Q_i^* - Q_i^{\text{факт}}|}{Q_i^{\text{факт}}},\end{aligned}\quad (24)$$

где P^* , Q^* и Π^* — расчетные значения цены, объема рынка отрасли и прибыли отрасли при равновесном состоянии; $P^{\text{факт}}$, $Q^{\text{факт}}$, $\Pi^{\text{факт}}$ — фактические значения параметров рынка в ретроспективном периоде. Методика оценки адекватности модели рынка олигополии (24) основана на принципе гарантированного результата [36], т. е. выбор адекватной модели осуществляется по комплексному критерию:

$$\Omega = \min_m \max_{m=1, 2, 3, 4} \Omega_m. \quad (25)$$

Рассчитаны следующие равновесные состояния рынка олигополии: равновесие Курно определено путем численного решения системы уравнений (9); равновесие Штакельберга с одним лидером определено из системы уравнений (9) для агентов Курно и уравнения (13) для лидера по Штакельбергу; равновесие в классической модели Штакельберга с несколькими лидерами определено из системы уравнений (9) для агентов Курно и уравнений (13) для лидера по Штакельбергу; равновесие в модели Штакельберга с информационной рефлексией лидеров найдено численным решением системы уравнений (9) для агентов Курно, уравнений (13)

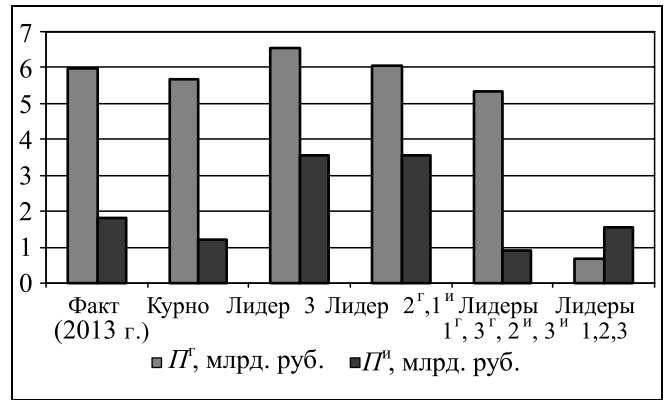


Рис. 6. Суммарная прибыль телекоммуникационного рынка в 2013 г. и расчетные значения при различных моделях за предоставление голосовых услуг («г») и интернет-трафика («и»)

для лидеров первого уровня и уравнений (17) для лидеров второго уровня. При этом учитывались линейные модели регрессий цен (21), соответствующие актуальному ретроспективному периоду 2009—2013 гг., и нелинейные модели регрессий издержек агентов (23).

Проведем анализ моделей равновесия (табл. 1, 2, рис. 6), рассмотрев наиболее вероятные модели состояния рынка с учетом его структурирования в 2013 г. и имеющие наиболее высокие оценки адекватности (24). Наименьший уровень отклонений от фактических в 2013 г. значений объемов услуг (12 % для голосовых услуг и 4 % для интернет-трафика) и цен (9 % для голосовых услуг и 14 % для интернет-трафика) достигается для моделей Курно. Несмотря на то, что модель, в которой лидерами по Штакельбергу являются три преобладающих на рынке агента, для рынка интернет-трафика имеет более высокую точность по равновесной цене (8 %), отклонение рыночных долей двух из трех преобладающих на рынке агентов по модели от фактических значений относительно выше. Модель рынка голосовых услуг с одним лидером 2 по Штакельбергу имеет более высокую точность по объему рынка (3 %) и равновесной цене (1 %), чем модель Курно, однако наличие значительных отклонений (в 2—2,5 раза) рыночных долей двух из трех крупнейших агентов от фактических значений не позволяет признать эту модель адекватной. Анализ относительных отклонений фактической суммарной прибыли рынка в 2013 г. от расчетных значений также приводит к выводу, что модель Курно наиболее адекватна, поскольку отклонения прибыли рынка голосовых услуг составили 5 %, рынка интернет-трафика — 32 %, однако для других моделей максимальное по двум рынкам отклонение существенно выше. Поэтому с учетом це-

Таблица 1

Анализ рынка голосовых услуг

Агент	Показатели в 2013 г.		Модель Курно, $P^Г = 0,91$ руб.			Модель с одним лидером 3, $P^Г = 0,80$ руб.			Модель с одним лидером 2, $P^Г = 1,01$ руб.			Модель с двумя лидерами 1 и 3, $P^Г = 0,87$ руб.			Модель с тремя лидерами 1, 2 и 3, $P^Г = 0,74$ руб.		
	$Q^Г$, млрд мин	$P^Г$, руб.	$Q^Г$, млрд мин	$\Delta \bar{Q}^Г$, %	$\Delta \bar{P}^Г$, %	$Q^Г$, млрд мин	$\Delta \bar{Q}^Г$, %	$\Delta \bar{P}^Г$, %	$Q^Г$, млрд мин	$\Delta \bar{Q}^Г$, %	$\Delta \bar{P}^Г$, %	$Q^Г$, млрд мин	$\Delta \bar{Q}^Г$, %	$\Delta \bar{P}^Г$, %	$Q^Г$, млрд мин	$\Delta \bar{Q}^Г$, %	$\Delta \bar{P}^Г$, %
1	6,44	0,97	4,20	-35	-6	2,98	-54	-17	5,45	-15	4	5,27	-18	-11	5,21	-19	-24
2	6,55	0,99	8,68	33	-8	3,56	-46	-19	16,80	157	2	6,79	4	-12	17,33	165	-26
3	10,35	1,00	13,27	28	-9	23,68	129	-20	0,26	-98	1	15,69	52	-13	10,10	-2	-26
4	0,27	1,05	0,27	1	-13	0,24	-10	-24	0,30	10	-4	0,26	-3	-17	0,23	-16	-30
Всего	23,61	1,00	26,42	-12	-9	30,46	29	-20	22,81	-3	1	28,01	19	-13	32,87	39	-27

Таблица 2

Анализ рынка услуг интернет-передачи

Агент	Показатели в 2013 г.		Модель Курно, $P^И = 1,27$ руб.			Модель с одним лидером 3, $P^И = 1,97$ руб.			Модель с одним лидером 2, $P^И = 1,99$ руб.			Модель с двумя лидерами 1 и 3, $P^И = 1,13$ руб.			Модель с тремя лидерами 1, 2 и 3, $P^И = 1,36$ руб.		
	$Q^И$, млн Мб	$P^И$, руб.	$Q^И$, млн Мб	$\Delta \bar{Q}^И$, %	$\Delta \bar{P}^И$, %	$Q^И$, млн Мб	$\Delta \bar{Q}^И$, %	$\Delta \bar{P}^И$, %	$Q^И$, млн Мб	$\Delta \bar{Q}^И$, %	$\Delta \bar{P}^И$, %	$Q^И$, млн Мб	$\Delta \bar{Q}^И$, %	$\Delta \bar{P}^И$, %	$Q^И$, млн Мб	$\Delta \bar{Q}^И$, %	$\Delta \bar{P}^И$, %
1	1475	1,30	1692	15	-3	79	-95	52	3089	109	53	416	-72	-13	882	-40	5
2	1268	1,50	1389	10	-16	87	-93	31	86	-93	32	2220	75	-25	1711	35	-9
3	2297	1,40	1734	-25	-10	3160	38	41	121	-95	42	2449	7	-19	2026	-12	-3
4	43	1,70	73	68	-26	23	-48	16	22	-49	17	101	132	-34	60	38	-20
Всего	5083	1,48	4888	4	-14	3348	-34	34	3318	-35	35	5186	2	-23	4678	-8	-8



лостности телекоммуникационного рынка следует рассматривать в качестве базовой единую модель Курно для голосовых услуг и интернет-трафика.

Если базироваться на предположении о возможной изолированности рынков голосовых услуг и интернет-трафика, то, применяя критерии (24) и (25) отдельно по каждому рынку, заметим, что модель Курно сохраняет адекватность для рынка голосовых услуг, а для рынка интернет-трафика наиболее адекватной представляется модель Штакельберга с тремя лидерами. Прибыль интернет-рынка, рассчитанная в последнем случае, выше аналогичного показателя для модели Курно и отличается от фактического показателя рынка лишь на 14 %. Экономически это означает, что в традиционном сегменте голосовых услуг рыночная структура стабилизировалась, а центр тяжести конкурентной борьбы преобладающих агентов перенесен на развивающийся рынок интернет-трафика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структуры реальных рынков олигополии, модели которых ранее строились на основе линейных функций спроса и издержек агентов, исследованы с помощью линейных и степенных функций спроса при нелинейных функциях издержек в целях повышения точности идентификации рыночных равновесий. Разработаны аналитические модели неиерархической рыночной структуры при реагировании по Курно, а также иерархических структур в виде асимметричного равновесия с лидером по Штакельбергу и равновесия по Штакельбергу с информационной рефлексией лидеров.

Неиерархическая рыночная структура типа Курно характеризуется асимметричным распределением рыночных долей, причем перераспределение рынка направлено в пользу агентов с меньшими темпами роста функций издержек. Однако при моделировании реальных рынков возникающая асимметрия незначительна в силу несущественности влияния на равновесную структуру компонента издержек по сравнению с компонентом спроса из-за количественной несоизмеримости параметров этих функций, а также вследствие незначительных различий между темповыми параметрами функций издержек преобладающих агентов, производящих идентичный товар и поэтому использующих типовые технологии.

Иерархическая рыночная структура типа Штакельберга предопределяет существенно большую асимметрию распределения рынка между агентами вследствие дополнительного влияния на устанавливаемое равновесие суммы предположительных вариаций, сопоставимой по размеру с па-

раметрами функции спроса. Введение нелинейных функций издержек в разработанные модели реакций агентов позволило учесть влияние эффекта расширения масштаба агента на предположительные вариации: переменный характер предположительных вариаций отражает воздействие сложившейся структуры рынка и технологий агентов (функций издержек) на интенсивность реагирования агентов. Формирующая в результате равновесная рыночная структура должна быть смещена в пользу агентов высшего уровня предположительной информированности и перераспределена между агентами низшего уровня информированности в пользу имеющих положительный эффект расширения масштаба. В случае равновесия Штакельберга с информационной рефлексией лидеров влияние предположительных вариаций еще более усиливается, из-за чего рынок существенно перераспределяется в пользу лидеров более высокого уровня информированности.

В контексте решения практической задачи выбора стратегий фирм на рынках олигополии разработанный комплекс моделей позволяет путем варьирования типов реакций и уровней предположительной информированности построить формализованное описание равновесия для различных симметричных и асимметричных реальных рыночных структур.

Моделирование динамики показателей телекоммуникационного рынка Поволжья показало его олигополистическое состояние, подтвердило наличие степенных функций цен на раннем этапе развития и линейных функций цен в последние годы, позволило сформировать функции издержек агентов, характеризующиеся различными эффектами расширения масштаба. Численный анализ равновесий, сформированных на основе разработанных моделей реагирования агентов, показал, что наиболее адекватной среди рассмотренных моделей реагирования в контексте ситуации, сложившейся на телекоммуникационном рынке Поволжья в 2013 г., является модель Курно, что косвенно свидетельствует о стабилизации действий агентов в условиях устойчивого распределения рынка. Исходя из этого можно предположить, что информационная рефлексия перестала значимо влиять на повышение прибыли агентов рынка в отличие от фазы резкого объемного роста и перераспределения рыночных долей между агентами в 2004—2008 гг.; поэтому перспективной стратегией агентов видится перераспределение рынка путем усовершенствования технологий в целях повышения эффекта масштаба до уровня, уже достигнутого на интернет-рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bowley A.L.* The Mathematical Groundwork of Economics. — Oxford: Oxford University Press, 1924.
2. *Perry M.K.* Oligopoly and Consistent Conjectural Variations // *Bell Journal of Economics*. — 1982. — Vol. 13, N 1. — P. 197—205.
3. *Bresnahan Timothy F.* Duopoly Models with Consistent Conjectures // *The American Economic Review*. — 1981. — Vol. 71, N 5. — P. 934—945.
4. Булавский В.А., Калашиников В.В. Равновесие в обобщенных моделях Курно и Штакельберга // *Экономика и математические методы*. — 1995. — Т. 31, вып. 3. — С. 5—33.
5. *Kalashnikov V.V., Bulavsky V.A., Kalashnykova N.I., and Castillo F.J.* Mixed oligopoly with consistent conjectures // *European Journal of Operational Research*. — 2011. — Vol. 210, iss. 3. — P. 729—735.
6. Дмитриенко К.Ю. Моделирование оптимального поведения фирмы на рынке олигополии при условии неценовой дифференциации товара // *Вестник НГУ. Сер.: Социально-экономические науки*. — 2009. — Т. 9, вып. 1. — С. 45—53.
7. Мицель А.А., Козлов С.В. Модели олигополии // *Известия Томского политех. ин-та. Экономика*. — 2006. — Т. 311, № 6. — С. 4—8.
8. Филатов А.Ю. Развитие модели бертрана на случай несовершенной ценовой эластичности спроса // *Равновесные модели экономики и энергетики: Тр. Всерос. конф. и секции Математической экономики XIII Байкальской междунар. школы-семинара «Методы оптимизации и их приложения»*. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005.
9. Каверина И.А., Каверин С.В. Стратегии оптимального ценообразования в условиях олигополии с лидером // *Педагогическая инноватика: инновационное образование, инновационное мышление, инновации*. — Балашиха: ИСЭПиМ, 2010. — С. 6—16.
10. Соловьев В.И. Экономико-математическое моделирование рынка программного обеспечения. — М.: Вега-Инфо, 2009.
11. Гриценко, Д.В. Динамическая эффективность равновесий Курно и Бертрана в дифференцированной олигополии в условиях конкуренции в области инновационных разработок // *Экономические науки*. — 2009. — № 5. — С. 312—318.
12. Понькина Е.В., Маничева А.С., Комаров П.В. Модель расщепленного рынка с барьерами на вход // *Управление, вычислительная техника и информатика*. — 2010. — С. 66—78.
13. Гонтарев А.В., Чхартишвили А.Г. О явных и скрытых коалициях в рефлексивных играх // *Управление большими системами*. — 2008. — Вып. 26. — С. 46—63.
14. Лукашина Е.В. Моделирование стратегической торговой политики на международном рынке с вертикальными связями // *Управление экономическими системами: электронный научный журнал*. — 2010. — Вып. 2 (22). — С. 10—16.
15. Калинин В.И. Моделирование и оптимизация стратегий развития рекреационно-туристских территорий // *Экономический вестник Ростовского государственного университета*. — 2009. — Т. 7, вып. 3. — С. 56—59.
16. Белгарян А.В., Булавский В.А. Модель олигополии при наличии постоянных затрат // *Экономика и математические методы*. — 2004. — Т. 40, № 3. — С. 124—127.
17. Акопов А.С. Модель двухпродуктовой олигополии, описывающая взаимодействие нефтяных компаний на внутреннем рынке // *Аудит и финансовый анализ*. — 2004. — № 1. — С. 56—67.
18. Айзенберг Н.И., Зоркальцев В.И., Киселева М.А. Модели несовершенной конкуренции применительно к анализу электроэнергетического рынка Сибири // *Журнал Новой экономической ассоциации*. — 2013. — № 2 (18). — С. 62—88.
19. *Albinger J.* Economic model for monopoly analysis in telecommunication: proposal to demonstrate uniqueness // *Business Intelligence Journal*. — 2009. — Vol. 2, N 1. — URL: <http://www.saycocorporativo.com/saycoUK/BIJ/journal/Vol2No1/article2.pdf> (дата обращения 07.09.2015).
20. Yu S.M., Kim S.-L. Price War in Wireless Access Networks: A Regulation for Convergence // *Global Telecommunications Conference. GLOBECOM. IEEE — GLOBECOM, 2011*. — P. 1—5.
21. *De Mesnard L.* Is the French mobile phone cartel really a cartel? — URL: <https://ideas.repec.org/p/lat/legeco/e2009-02.html> (дата обращения 07.09.2015).
22. Miao M., Xiong F., Zhou J. Game among mobile operators, bank and the third-party payment services providers in mobile payment market // *Intern. Journal of u- and e-Service, Science and Technology*. — 2014. — Vol. 7. — N 1. — P. 177—188.
23. *Ke-fei Liu K.-F., Zhao R.* Co-competition game analysis of mobile communication market after company restructuring // *Proc. of the 2012 Intern. Conf. on Machine Learning and Cybernetics, Xian*. — 15—17 July, 2012. — P. 654—659.
24. *Patinkin, D.* John Maynard Keynes in The New Palgrave Dictionary of Economics. Macmillan. — 1997. — Vol. 3. — P. 25.
25. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами. — М.: Кн. дом «Либроком», 2009.
26. Пиндайк Р., Рубинфельд Д. Микроэкономика. — М.: Дело, 2000.
27. Гераськин М.И., Кореева Е.Б., Кузнецов М.И. Модели согласования экономических интересов агентов на рынке сотовой связи Самарской области // *Terra Economicus*. (Экономический вестник Ростовского гос. ун-та.). — 2008. — Т. 6. — № 4, ч. 2. — С. 278—285.
28. Дюсуше О.М. Статичное равновесие Курно-Нэша и рефлексивные игры олигополии: случай линейных функций спроса и издержек // *Экономический журнал ВШЭ*. — 2006. — № 1. — С. 3—32.
29. Васин А.А., Морозов В.В. Теория игр и модели математической экономики. — М.: Макс Пресс, 2005. — 272 с.
30. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексивные игры. — М.: СИНТЕГ, 2003. — 160 с.
31. Раскрытие информации: — URL: <http://corp.megafon.ru/investors/disclosure/> (дата обращения 07.09.2015).
32. *VimpelCom* Annual reports. — URL: <http://vimpelcom.com/#Investor-relations/Reports—results/Annual-reports/> (дата обращения 07.09.2015).
33. Финансовая отчетность. — URL: <http://www.company.mts.ru/comp/ir/report/> (дата обращения 07.09.2015).
34. Годовые отчеты компании. Отчетность / СМАРТС — сотовый оператор. Самара, 2014. — URL: <http://rus.smarts.ru/accounting/year/> (дата обращения 07.09.2015).
35. Фран Р.Х. Микроэкономика и поведение. — М.: Инфра-М, 2000.
36. Махулин Ю.К. Методы и модели векторной оптимизации. — М.: Наука, 1986.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Гераськин Михаил Иванович — д-р экон. наук, зав. кафедрой, Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет),
✉ innovation@ssau.ru,

Чхартишвили Александр Гедванович — д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ sandro_ch@mail.ru.



ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

М.Дж. Марданов, Р.Р. Рзаев, З.Р. Джамалов, В.И. Гасанов

Предложен метод для оценки конкурентоспособности высших учебных заведений с последующим их ранжированием, основанный на применении системы нечеткого логического вывода. Оценивание конкурентоспособности вуза включает в себя многокритериальные оценки маркетинговой среды и конкурентной позиции вуза на рынке образовательных услуг. Предложенный подход апробирован на примере гипотетических вузов, отличающихся произвольно выбранными эндогенными и экзогенными характеристиками.

Ключевые слова: конкурентоспособность вуза, маркетинговое пространство, образовательные услуги, нечеткое множество, нечеткий вывод.

ВВЕДЕНИЕ

Любое высшее учебное заведение — это, прежде всего, сложная, открытая и динамически развивающаяся система. В современных условиях главной отличительной особенностью вуза является его способность к своевременной адаптации к условиям окружающей среды, которая выражается системой показателей, характеризующих состояние его конкурентоспособности. На языке экономистов конкурентоспособность вуза представляет собой совокупную характеристику процесса обучения и отражает уровень его соответствия конкретной общественной полезности. Поэтому считается, что уровень компетентности руководства вуза определяется, прежде всего, его способностью поддерживать образовательный процесс лучше, чем другие вузы, т. е. возможностями сохранять конкурентоспособность вуза, позволяющую привлекать и сохранять учащихся.

Многие региональные рынки образовательных услуг на постсоветском пространстве характеризуются высокой степенью конкуренции, которая со временем только обостряется. Основными воздействующими факторами выступают стратегические приоритеты повышения доступности и качества образования, интеграция и мобильность образовательных услуг на глобальном рынке образовательных услуг, наметившаяся тенденция уменьшения желающих получить высшее образование и др.

Изучению конкурентных преимуществ предоставляемых вузами образовательных услуг посвящены работы многих авторов. Среди современных исследователей проблемы конкурентоспособности вузов особого внимания заслуживают работы Т.В. Даниловой [1], в которых предложена методика конкурентного бенчмаркинга образовательных услуг вуза; Р.А. Фатхудинова [2], рассматривающего задачу управления конкурентоспособностью вузом в контексте экономической теории проблемы конкурентоспособности (см., например, работы [3, 4]), а также работы других российских экономистов, например, Л.Н. Быковой [5], В.А. Лазарева и С.А. Мохначева [6], Н.Г. Багаудинова [7] и др. Тем не менее, применительно к высшему образованию вопросы конкурентоспособности остаются пока еще недостаточно исследованными.

В работе [8] нами представлены типовые модели для оценок маркетингового пространства образовательных услуг и конкурентной позиции вуза на рынке труда, основанные на применении метода нечеткого логического вывода. В контексте проведенного там исследования предложен нечеткий подход к формированию гибкой и универсальной системы оценки конкурентоспособности вуза, где причинно-следственные связи для оценивания маркетинговой среды и конкурентоспособности образовательных услуг представлены в виде типовых нечетких лингвистических правил, которые сравнительно легко и быстро могут быть адапти-

рованы (и/или переформатированы) к возможным изменениям в исходных данных и начальных условиях.

Среди рассмотренных в работе [8] характеристик, влияющих на маркетинговую среду вузов и конкурентоспособность образовательных услуг на рынке труда, многие из них слабо структурированные и/или неструктурированные, т.е. такие, о которых известна их принадлежность к определенному типу. Поэтому для получения более всеобъемлющих оценок конкурентоспособности вузов нами применяется математический аппарат нечетких множеств и механизм нечеткого вывода, позволяющий вовлечь в вычислительный процесс неметризуемые (слабо структурированные) данные в виде термов лингвистических переменных, описываемых нечеткими множествами.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве исходной информации выберем критерии оценки маркетинговой среды с учетом деятельности других вузов и характеристики конкурентных позиций вуза на рынке образовательных услуг на текущий момент времени. Для проведения оценок возьмем за основу причинно-следственные связи, описанные в работе [8], в виде информационных фрагментов d_k и e_j , $k = 1 \div 6$; $j = 1 \div 7$.

Для оценки маркетинговой среды:

d_1 : «Если государственная поддержка вуза достаточна, текущее состояние экономики устойчиво, в социально-демографической динамике наблюдается рост, целевое ориентирование вуза обоснованное, а уровень кадрового состава высокий, тогда маркетинговая среда вуза является благоприятной»;

d_2 : «Если вдобавок к приведенным выше требованиям конкурс абитуриентов в вуз высокий, текущее социально-культурное положение общества высокое, организационная структура вуза сбалансированная и число вузов-конкурентов большое, тогда маркетинговая среда вуза является более чем благоприятной»;

d_3 : «Если дополнительно к оговоренным в d_2 условиям вуз поддерживает со средними школами тесные связи, популяризация вуза в медийных структурах непрерывная, политико-правовое обеспечение общества подходящее, вуз применяет современные технологии обучения, тогда маркетинговая среда вуза является безупречной»;

d_4 : «Если маркетинговая среда характеризуется всем оговоренным в d_3 , кроме информации о популяризации медийными структурами и наличии

целевого ориентирования вуза, тогда его маркетинговая среда является очень благоприятной»;

d_5 : «Если поддержка государства достаточная, конкурс абитуриентов высокий, текущее состояние национальной экономики устойчивое, в социально-демографической динамике наблюдается рост, текущее социально-культурное положение общества высокое, политико-правовое обеспечение общества подходящее, целевое ориентирование вуза обоснованное, вуз применяет современные технологии обучения, уровень кадрового состава высокий и число вузов-конкурентов большое, но при этом вуз не поддерживает тесных связей со средними школами, не популяризируется через средства массовой информации и его организационная структура несбалансированная, тогда маркетинговая среда вуза все же является благоприятной»;

d_6 : «Если конкурс абитуриентов в вуз невысокий, вуз не применяет современные технологии обучения, его организационная структура несбалансированная, а уровень кадрового состава низкий, тогда маркетинговая среда вуза является неблагоприятной».

Для оценки конкурентных позиций на рынке образовательных услуг:

e_1 : «Если рыночная доля большая и наблюдается устойчивая тенденция к ее увеличению, тогда вуз является лидером на рынке образовательных услуг»;

e_2 : «Если рыночная доля большая и наблюдается устойчивая тенденция к ее сохранению, тогда вуз является претендентом на лидерство на рынке образовательных услуг»;

e_3 : «Если рыночная доля средняя и наблюдается устойчивая тенденция к ее увеличению, тогда вуз также является претендентом на лидерство на рынке образовательных услуг»;

e_4 : «Если рыночная доля средняя и наблюдается устойчивая тенденция к ее сохранению, тогда вуз является «середняком» на рынке образовательных услуг»;

e_5 : «Если рыночная доля низкая и наблюдается устойчивая тенденция к ее сохранению, тогда вуз позиционируется на «низких» нишах рынка образовательных услуг»;

e_6 : «Если рыночная доля средняя и наблюдается устойчивая тенденция к ее уменьшению, тогда вуз также позиционируется на «низких» нишах рынка образовательных услуг»;

e_7 : «Если рыночная доля низкая и наблюдается устойчивая тенденция к ее уменьшению, тогда вуз является аутсайдером на рынке образовательных услуг».

С учетом этих рассуждений и полученных на их основе оценок, необходимо провести ранжирование вузов по уровням их конкурентоспособности.

2. НАБОР ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАРКЕТИНГОВОЙ СРЕДЫ ВУЗА

Для формирования полного набора входных и выходных характеристик применяемой нечеткой модели, представленных в виде термов соответствующих лингвистических переменных, необходимо предварительно провести основательный статистический анализ показателей, характеризующих маркетинговую среду вузов и конкурентоспособность предоставляемых ими образовательных услуг на рынке труда. Это достаточно трудоемкий процесс, от качества исполнения которого зависит адекватность конечных результатов. В частности, неточность в релевантной информации скажется на предварительных расчетах статистических данных и, тем самым, сделает процесс фаззификации входов применяемой нечеткой модели неадекватным.

Для определения универсумов (дискретных или непрерывных), на базе которых в приведенных высказываниях необходимо описать применяемые критерии оценки, например, такие как терм «низкая» (рыночная доля), воспользуемся данными из различных доступных источников информации.

Поддержка государства (x_1): осуществляется на всех уровнях управления вузом. Тем не менее, одной из главных ее составляющих является уровень финансирования или, более конкретно, объем денежных средств, приходящихся на одного студента. Поэтому здесь в качестве универсума выберем непрерывный интервал $U_1 = [0, 5000]$ в денежном эквиваленте, в рамках которого варьируются соответствующие показатели вузов [9].

Конкурс абитуриентов (x_2): определяется средним числом заявлений на одно место. Полагая максимальным по региону конкурс как 20 заявлений на одно место, в качестве универсума будем считать отрезок $U_2 = [0, 20]$.

Связь со средними школами (x_3): характеризуется следующими функциями довузовской подготовки [10]: 1) *компенсирующая*, подразумевающая ликвидацию пробелов в обязательных результатах среднего образования; 2) *развивающая*, позволяющая школьнику развивать свои способности и удовлетворить интеллектуальные потребности личности; 3) *адаптирующая*, направленная на облегчение приспособления школьников к учебному процессу вуза, его технологиям обучения и содержанию высшего образования; 4) *корректирующая*, приво-

дящая достигнутый уровень школьного образования в соответствие с требованием вуза; 5) *воспитательная*, способствующая становлению личности школьников, повышению их уровня развития и социальной адаптации. В данном случае в качестве универсума выберем дискретное множество $U_3 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, элементы которого указывают на число исполняемых вузом перечисленных функций. Например, компонента 3 означает, что вуз исполняет третью из обозначенных пяти функций.

Популяризация вуза медийными структурами (x_4): массовые внешние коммуникации, направленные на распространение научных знаний и/или формирование образа вуза в общественном сознании. Формами популяризации вуза служат любые средства коммуникации с обществом, которые могут использоваться для донесения научных знаний до широкой аудитории и формирования образа вуза в общественном сознании. Популяризация вуза характеризуется [11]: 1) ростом информационных потоков благодаря увеличению числа СМИ; 2) наличием научно-популярного сайта; 3) наличием виртуального музея; 4) наличием электронной библиотеки; 5) наличием электронного журнала; 6) наличием конвергентных редакций, готовящих материалы для разных каналов распространения информации. Аналогично предыдущему случаю в качестве универсума выберем дискретное множество $U_4 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, элементы которого указывают на число исполняемых вузом перечисленных функций. Например, компонента 6 означает, что вуз характеризуется всеми шестью формами популяризации.

Состояние национальной экономики (x_5): характеризуется макроэкономическими показателями [12]: 1) темпом изменения ВВП; 2) уровнем жизни населения; 3) наличием безработицы; 4) наличием и уровнем инфляции; 5) состоянием валютной системы; 6) сальдо платежного баланса. Для оценки состояния экономики можно воспользоваться системой нечеткого вывода с обозначенными выше макроэкономическими показателями как входными переменными и выходной лингвистической переменной, принимающей, например, на континууме $[0, 1]$ значения в виде термов «удовлетворительное», «более чем удовлетворительное», «очень удовлетворительное», «безупречное» или «неудовлетворительное» [13]. Но это предмет отдельного и серьезного исследования. Поэтому в качестве универсума выберем отрезок $U_5 = [0, 1]$, охватывающий условные значения, характеризующие уровни текущего состояния национальной экономики.

Социально-демографическая ситуация (x_6): состояние демографических процессов, состава и

размещения населения в какое-либо определенное время, чаще всего в том или ином году. Для анализа социально-демографической ситуации используются показатели [14]: 1) численность и плотность населения; 2) возрастная структура населения; 3) половая структура населения; 4) образовательная структура населения; 5) семейная структура населения; 6) этническая структура населения. Нахождение оценки социально-демографической ситуации составляет предмет исследования социологов и демографов. Мы же со своей стороны охарактеризуем наилучший исход по каждой из указанных составляющих термином «благоприятная» и установим универсум для наших последующих вычислений в виде дискретного множества $U_6 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, где, например, элемент 3 означает, что социально-демографическая ситуация благоприятная по трем показателям.

Социально-культурное положение общества (x_7): определяется уровнем взаимоотношения личности, сообществ людей и общества в целом при помощи таких регулирующих и контролирующих средств, как социальные нормы, социальные ценности и социальные институты. Здесь в качестве универсума выберем континуум $U_7 = [0, 1]$, который содержит значения консолидированных по регулятивным механизмам оценок социально-культурного положения общества.

Политико-правовое обеспечение общества (x_8): выражается наличием универсальных способов и механизмов организации политического порядка. В частности, демократическая система предполагает [15]: 1) обеспечение равноправия для участия в управлении делами общества; 2) периодичную выборность основных органов власти; 3) наличие механизмов, обеспечивающих относительное преимущество большинства и уважение прав меньшинства; 4) абсолютный приоритет правовых методов выбора власти; 5) профессиональный характер правления элит; 6) общественный контроль за принятием важнейших решений; 7) идейный плюрализм и конкуренцию мнений. Характеризуя наилучший исход по каждой из указанных составляющих термином «подходящее», установим универсум для наших последующих вычислений в виде дискретного множества $U_8 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$, где, например, компонента 5 означает, что политико-правовое обеспечение общества подходящее по пяти показателям.

Целевое ориентирование (x_9): предполагает формирование следующих принципов и подходов в организации деятельности вуза [16]: 1) выбор образовательных услуг, которые пользуются и будут пользоваться спросом; 2) перечень услуг доста-

точно широк и интенсивно обновляется с учетом требований общества и научно-технического прогресса; 3) осуществление маркетинга; 4) наличие согласованных с потребителями образовательных программ; 5) проведение ценовой политики с учетом рыночной конъюнктуры, деятельности конкурентов и объема платежеспособного спроса; 6) коммуникационная деятельность, направленная на конкретные целевые группы потребительских услуг образования и на возможных посредников; 7) наличие специалистов для принятия стратегических решений, компетентных в области образовательных услуг и экономике. Характеризуя наилучшие исходы по этим составляющим термом «обоснованное», выберем универсум в виде дискретного множества $U_9 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$, где, например, компонента 5 означает, что целевое ориентирование вуза обосновано по пяти показателям.

Применяемая технология обучения (x_{10}): обеспечивает управляемость процесса обучения. Современную технологию обучения характеризуют следующие принципы [17]: 1) технология разрабатывается под конкретный педагогический замысел, в основе ее лежит определенная методологическая, философская позиция преподавателя; 2) технологическая цепочка действий выстраивается строго в соответствии с целевыми установками, имеющими форму конкретного ожидаемого результата; 3) функционирование технологии предусматривает взаимосвязанную деятельность преподавателя и учащихся на договорной основе с учетом принципов индивидуализации и дифференциации, оптимальную реализацию человеческих и технических возможностей, использование диалога, общения; 4) поэтапное планирование и последовательное воплощение элементов педагогической технологии должны быть, с одной стороны, воспроизведены любым преподавателем и, с другой, гарантировать достижение планируемых результатов всеми учащимися; 5) диагностические процедуры, содержащие критерии, показатели и средства измерения результатов деятельности, являются органичной частью технологии обучения. Характеризуя наилучшие исходы по указанным принципам термином «имеет место», выберем универсум в виде дискретного множества $U_{10} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, где, например, компонента 0 означает, что применяемая в вузе технология обучения не соответствует ни одному из приведенных принципов, а, значит, являются отсталой; и, наоборот, компонента 5 означает, что применяемая в вузе технология соответствует всем пяти принципам и, следовательно, является современной.

Организационная структура вуза (x_{11}): представляет собой систему, состоящую из людей или групп людей, постоянно вступающих в различные взаимоотношения для решения общих задач. Сбалансированность организационной структуры проявляется [18]: 1) в закреплении всех функций вуза за конкретными подразделениями (работниками); 2) в осуществлении каждой функции только одним подразделением или исполнителем; 3) оптимальным диапазоном управления (количеством подчиненных руководителю); 4) оптимальным числом уровней управления; 5) детализацией деятельности по видам работ и процессам; 6) регламентацией и распределением обязанностей и полномочий. Характеризуя наилучшие исходы по указанным характеристикам термином «имеет место», выберем универсум в виде дискретного множества $U_{11} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, где компонента 0 означает, что организационная структура управления вуза является несбалансированной, а компонента 6 означает, что организационная структура управления вуза удовлетворяет всем шести требованиям и, следовательно, является полностью сбалансированной.

Уровень кадрового состава (x_{12}): устанавливается путем вычисления рейтинговой оценки преподавателей по основным направлениям их профессиональной деятельности [19]: 1) учебно-методическая работа; 2) научно-исследовательская работа; 3) воспитательная и организационная работа; 4) показатели достигнутого уровня квалификации. Тогда, характеризуя наилучшие исходы по всем составляющим деятельности преподавателей термином «высокий», выберем универсум в виде дискретного множества $U_{12} = \{0, 1, 2, 3, 4\}$, где компонента 0 означает, что уровень кадрового состава вуза низкий, а компонента 4 означает, что этот уровень высокий по всем четырем составляющим и, следовательно, высокий в совокупности.

Число вузов-конкурентов (x_{13}): является весьма условной величиной и каждый раз может меняться в зависимости от выбранной для оценки специальности и маркетинговой среды. Тем не менее, в качестве универсума выберем дискретное множество $U_{13} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, где 0 означает, что вуз не имеет конкурентов, а 6 — что его конкурентами являются 6 вузов, т.е. число конкурентов характеризуется уровнем «высокое».

Перечисленные лингвистические переменные системы нечеткого вывода, реализующей оценку маркетинговой среды вузов, упорядочим в виде табл. 1.

3. ОЦЕНКА МАРКЕТИНГОВОЙ СРЕДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА

В качестве альтернатив выберем пять гипотетических вузов: u_1, u_2, u_3, u_4 и u_5 , эндогенные и экзогенные характеристики которых представлены в табл. 2. Полагая, что выбранные вузы функционируют в едином правовом и административном пространстве, будем считать их экзогенные характеристики одинаковыми.

Таким образом, отправляясь от рассуждений d_i , $i = 1 \div 6$, приведенных в § 1, модель для оценки маркетинговой среды вуза построим в виде следующих правил:

d_1 : «Если x_1 = БОЛЕЕ ЧЕМ ДОСТАТОЧНАЯ и x_5 = УСТОЙЧИВОЕ и x_6 = ДИНАМИЧНО ВОЗРАСТАЮЩАЯ и x_9 = ОБОСНОВАННОЕ и x_{12} = ВЫСОКИЙ, тогда y = БЛАГОПРИЯТНАЯ»;

d_2 : «Если x_1 = БОЛЕЕ ЧЕМ ДОСТАТОЧНАЯ и x_2 = ВЫСОКИЙ и x_5 = УСТОЙЧИВОЕ и x_6 = ДИНАМИЧНО ВОЗРАСТАЮЩАЯ и x_7 = ВЫСОКОЕ и x_9 = ОБОСНОВАННОЕ и x_{11} = СБАЛАНСИРОВАННАЯ и x_{12} = ВЫСОКИЙ и x_{13} = БОЛЬШОЕ, тогда y = БОЛЕЕ ЧЕМ БЛАГОПРИЯТНАЯ»;

d_3 : «Если x_1 = БОЛЕЕ ЧЕМ ДОСТАТОЧНАЯ и x_2 = ВЫСОКИЙ и x_3 = ТЕСНЫЕ и x_4 = НЕПРЕРЫВНАЯ и x_5 = УСТОЙЧИВОЕ и x_6 = ДИНАМИЧНО ВОЗРАСТАЮЩАЯ и x_7 = ВЫСОКОЕ и x_8 = ПОХОДЯЩЕЕ и x_9 = ОБОСНОВАННОЕ и x_{10} = СОВРЕМЕННАЯ и x_{11} = СБАЛАНСИРОВАННАЯ и x_{12} = ВЫСОКИЙ и x_{13} = БОЛЬШОЕ, тогда y = БЕЗУПРЕЧНАЯ»;

d_4 : «Если x_1 = БОЛЕЕ ЧЕМ ДОСТАТОЧНАЯ и x_2 = ВЫСОКИЙ и x_3 = ТЕСНЫЕ и x_5 = УСТОЙЧИВОЕ и x_6 = ДИНАМИЧНО ВОЗРАСТАЮЩАЯ и x_7 = ВЫСОКОЕ и x_8 = ПОХОДЯЩЕЕ и x_{10} = СОВРЕМЕННАЯ и x_{11} = СБАЛАНСИРОВАННАЯ и x_{12} = ВЫСОКИЙ и x_{13} = БОЛЬШОЕ, тогда y = ОЧЕНЬ БЛАГОПРИЯТНАЯ»;

d_5 : «Если x_1 = БОЛЕЕ ЧЕМ ДОСТАТОЧНАЯ и x_2 = ВЫСОКИЙ и x_3 = СЛАБАЯ и x_4 = ПОПЕРЕМЕННАЯ и x_5 = УСТОЙЧИВОЕ и x_6 = ДИНАМИЧНО ВОЗРАСТАЮЩАЯ и x_7 = ВЫСОКОЕ и x_8 = ПОХОДЯЩЕЕ и x_9 = ОБОСНОВАННОЕ и x_{10} = СОВРЕМЕННАЯ и x_{11} = НЕСБАЛАНСИРОВАННАЯ и x_{12} = ВЫСОКИЙ и x_{13} = БОЛЬШОЕ, тогда y = БЛАГОПРИЯТНАЯ»;

d_6 : «Если x_2 = НЕВЫСОКИЙ и x_{10} = НЕСОВРЕМЕННАЯ и x_{11} = НЕСБАЛАНСИРОВАННАЯ и x_{12} = НЕВЫСОКИЙ, тогда y = НЕБЛАГОПРИЯТНАЯ».

Множество искомых решений характеризуется набором термов лингвистических переменных x_k , $k = 1 \div 13$. Используемые в правилах d_1 – d_6 термы

Переменные системы нечеткого вывода для оценки маркетинговой среды

Входные переменные	x_1	Имя переменной	Поддержка государства
		Терм-множества	недостаточная, достаточная, более чем достаточная
		Универсум	$U_1 = [0, 5000]$
	x_2	Имя переменной	Конкурс абитуриентов
		Терм-множества	низкий, средний, высокий
		Универсум	$U_2 = [0, 20]$
	x_3	Имя переменной	Связь со средними школами
		Терм-множества	слабая, попеременная, тесная
		Универсум	$U_3 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$
	x_4	Имя переменной	Популяризация медийными структурами
		Терм-множества	слабая, попеременная, непрерывная
		Универсум	$U_4 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
	x_5	Имя переменной	Состояние национальной экономики
		Терм-множества	неустойчивое, устойчивое
		Универсум	$U_5 = [0, 1]$
	x_6	Имя переменной	Социально-демографическая ситуация
		Терм-множества	динамично ухудшающаяся, стабильно постоянная, динамично улучшающаяся
		Универсум	$U_6 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
	x_7	Имя переменной	Социально-культурное положение общества
		Терм-множества	низкое, среднее, высокое
		Универсум	$U_7 = [0, 1]$
	x_8	Имя переменной	Политико-правовое обеспечение общества
		Терм-множества	неподходящее, подходящее
		Универсум	$U_8 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$
	x_9	Имя переменной	Целевое ориентирование
		Терм-множества	необоснованное, слабо обоснованное, обоснованное
		Универсум	$U_9 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$
	x_{10}	Имя переменной	Применяемая технология обучения
		Терм-множества	отсталая, частично современная, современная
		Универсум	$U_{10} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$
	x_{11}	Имя переменной	Организационная структура вуза
		Терм-множества	несбалансированная, отчасти сбалансированная, сбалансированная
		Универсум	$U_{11} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
	x_{12}	Имя переменной	Уровень профессорско-преподавательского состава
		Терм-множества	низкий, ниже среднего, средний, выше среднего, высокий
		Универсум	$U_{12} = \{0, 1, 2, 3, 4\}$
	x_{13}	Имя переменной	Число вузов-конкурентов
		Терм-множества	малое, среднее, большое
		Универсум	$U_{13} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
Выходная переменная (y)		Имя переменной	Благоприятствование маркетинговой среды вуза
		Терм-множества	неблагоприятная, благоприятная, более чем благоприятная, очень благоприятная, безупречная
		Универсум	$J = \{0, 0,1, 0,2,..., 1\}$



описываются нечеткими множествами A_k с функциями принадлежности $\mu_{A_k}(u)$, где $u \in U_k$, $k = 1 \div 13$. В качестве такой функции выберем функцию гауссова типа $\mu_{A_k}(u) = \exp\{-(u - u_{0k})^2/\sigma_k^2\}$, восстанавливающую A_k по опорному вектору $\mathbf{C} = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$, где u_{0k} — крайняя правая точка универсума U_k , $k = 1 \div 13$; σ_k^2 — плотность распределения соседних элементов. В частности, для терм-множества A_1 = более чем достаточная (поддержка государства) гауссовская функция принадлежности будет иметь вид: $\mu_{A_1}(u) = \exp\{-(u - 5000)^2/2000^2\}$.

Таким образом, взяв за основу сформулированное выше правило фаззификации, представим нечеткие множества, описывающие термы в левых частях приведенных импликативных правил по опорному вектору $\mathbf{C} = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$, в виде:

- «БОЛЕЕ ЧЕМ ДОСТАТОЧНАЯ» (господдержка):

$$A_1 = \frac{0,57}{u_1} + \frac{0,94}{u_2} + \frac{0,29}{u_3} + \frac{0,77}{u_4} + \frac{0,11}{u_5};$$

- «ВЫСОКИЙ» (конкурс абитуриентов):

$$A_2 = \frac{0,12}{u_1} + \frac{0,92}{u_2} + \frac{0,24}{u_3} + \frac{0,48}{u_4} + \frac{0,02}{u_5};$$

- «ТЕСНАЯ» (связь со средними школами):

$$A_3 = \frac{0,37}{u_1} + \frac{0,78}{u_2} + \frac{0,11}{u_3} + \frac{0,02}{u_4} + \frac{0,11}{u_5};$$

- «НЕПРЕРЫВНАЯ» (популяризация):

$$A_4 = \frac{0,06}{u_1} + \frac{0,21}{u_2} + \frac{0,50}{u_3} + \frac{0,06}{u_4} + \frac{0,21}{u_5};$$

- «УСТОЙЧИВОЕ» (состояние экономики):

$$A_5 = \frac{0,61}{u_1} + \frac{0,61}{u_2} + \frac{0,61}{u_3} + \frac{0,61}{u_4} + \frac{0,61}{u_5};$$

- «ДИНАМИЧНО УЛУЧШАЮЩАЯСЯ» (демография):

$$A_6 = \frac{0,84}{u_1} + \frac{0,84}{u_2} + \frac{0,84}{u_3} + \frac{0,84}{u_4} + \frac{0,84}{u_5};$$

- «ВЫСОКОЕ» (социально-культурное положение):

$$A_7 = \frac{0,82}{u_1} + \frac{0,82}{u_2} + \frac{0,82}{u_3} + \frac{0,82}{u_4} + \frac{0,82}{u_5};$$

- «ПОДХОДЯЩЕЕ» (правовое обеспечение):

$$A_8 = \frac{0,32}{u_1} + \frac{0,32}{u_2} + \frac{0,32}{u_3} + \frac{0,32}{u_4} + \frac{0,32}{u_5};$$

- «ОБОСНОВАННОЕ» (целевое ориентирование):

$$A_9 = \frac{0,13}{u_1} + \frac{0,88}{u_2} + \frac{0,04}{u_3} + \frac{0,32}{u_4} + \frac{0,60}{u_5};$$

- «СОВРЕМЕННАЯ» (технология обучения):

$$A_{10} = \frac{0,12}{u_1} + \frac{1,00}{u_2} + \frac{0,02}{u_3} + \frac{0,37}{u_4} + \frac{0,78}{u_5};$$

- «СБАЛАНСИРОВАННАЯ» (структура вуза):

$$A_{11} = \frac{0,01}{u_1} + \frac{0,84}{u_2} + \frac{0,21}{u_3} + \frac{0,50}{u_4} + \frac{0,06}{u_5};$$

- «ВЫСОКИЙ» (уровень преподавателей):

$$A_{12} = \frac{0,37}{u_1} + \frac{0,78}{u_2} + \frac{0,11}{u_3} + \frac{0,37}{u_4} + \frac{0,11}{u_5};$$

Таблица 2

Эндогенные и экзогенные характеристики вузов

У/о	Входные переменные	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
x_1	Поддержка государства	3500	4510	2770	3980	2040
x_2	Конкурс абитуриентов	8,3	17,7	10,5	13,1	4,4
x_3	Связь со средними школами	3	4	2	1	2
x_4	Популяризация медийными структурами	2	3	4	2	3
x_5	Состояние национальной экономики*	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
x_6	Социально-демографическая ситуация*	5	5	5	5	5
x_7	Социально-культурное положение общества*	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
x_8	Политико-правовое обеспечение общества*	4	4	4	4	4
x_9	Целевое ориентирование	3	6	2	4	5
x_{10}	Применяемая технология обучения	2	5	1	3	4
x_{11}	Организационная структура вуза	1	5	3	4	2
x_{12}	Уровень профессорско-преподавательского состава	2	3	1	2	1
x_{13}	Число вузов-конкурентов	3	4	2	1	5

* Экзогенные характеристики, одинаковые для единого правового и административного пространства.

- «БОЛЬШОЕ» (число вузов-конкурентов):

$$A_{13} = \frac{0,21}{u_1} + \frac{0,50}{u_2} + \frac{0,06}{u_3} + \frac{0,01}{u_4} + \frac{0,84}{u_5}.$$

Для описания термов выходной переменной Y : F = благоприятная, MF = более чем благоприятная, P = безупречная, VF = очень благоприятная, UF = неблагоприятная, воспользуемся функциями принадлежности [6]: $\mu_F(j) = j$; $\mu_{MF}(j) = \sqrt{j}$; $\mu_P(j) = 1$, если $j = 1$ и $\mu_P(j) = 0$, если $j < 1$; $\mu_{VF}(j) = j^2$; $\mu_{UF}(j) = 1 - j$, где $j \in J$ (см. табл. 1).

Тогда с учетом принятых описаний выбранные правила будут иметь вид:

d_1 : «Если $X_1 = A_1$ и $X_5 = A_5$ и $X_6 = A_6$ и $X_9 = A_9$ и $X_{12} = A_{12}$, тогда $Y = F$ »;

d_2 : «Если $X_1 = A_1$ и $X_2 = A_2$ и $X_5 = A_5$ и $X_6 = A_6$ и $X_7 = A_7$ и $X_9 = A_9$ и $X_{11} = A_{11}$ и $X_{12} = A_{12}$ и $X_{13} = A_{13}$, тогда $Y = MF$ »;

d_3 : «Если $X_1 = A_1$ и $X_2 = A_2$ и $X_3 = A_3$ и $X_4 = A_4$ и $X_5 = A_5$ и $X_6 = A_6$ и $X_7 = A_7$ и $X_8 = A_8$ и $X_9 = A_9$ и $X_{10} = A_{10}$ и $X_{11} = A_{11}$ и $X_{12} = A_{12}$ и $X_{13} = A_{13}$, то $Y = P$ »;

d_4 : «Если $X_1 = A_1$ и $X_2 = A_2$ и $X_3 = A_3$ и $X_5 = A_5$ и $X_6 = A_6$ и $X_7 = A_7$ и $X_8 = A_8$ и $X_{10} = A_{10}$ и $X_{11} = A_{11}$ и $X_{12} = A_{12}$ и $X_{13} = A_{13}$, то $Y = VF$ »;

d_5 : «Если $X_1 = A_1$ и $X_2 = A_2$ и $X_3 = \neg A_3$ и $X_4 = \neg A_4$ и $X_5 = A_5$ и $X_6 = A_6$ и $X_7 = A_7$ и $X_8 = A_8$ и $X_9 = A_9$ и $X_{10} = A_{10}$ и $X_{11} = \neg A_{11}$ и $X_{12} = A_{12}$ и $X_{13} = A_{13}$, то $Y = F$ »;

d_6 : «Если $X_2 = \neg A_2$ и $X_{10} = \neg A_{10}$ и $X_{11} = \neg A_{11}$ и $X_{12} = \neg A_{12}$, то $Y = UF$ ».

Далее, реализуя логическую операцию «И» путем пересечения нечетких множеств, т.е. находим

минимумов соответствующих им функций принадлежности, для левых частей правил получим результирующие множества M_i , $i = 1 \div 6$:

$$M_1 = \frac{0,130}{u_1} + \frac{0,613}{u_2} + \frac{0,041}{u_3} + \frac{0,317}{u_4} + \frac{0,105}{u_5};$$

$$M_2 = \frac{0,013}{u_1} + \frac{0,499}{u_2} + \frac{0,041}{u_3} + \frac{0,013}{u_4} + \frac{0,022}{u_5};$$

$$M_3 = \frac{0,013}{u_1} + \frac{0,210}{u_2} + \frac{0,018}{u_3} + \frac{0,013}{u_4} + \frac{0,022}{u_5};$$

$$M_4 = \frac{0,013}{u_1} + \frac{0,317}{u_2} + \frac{0,018}{u_3} + \frac{0,013}{u_4} + \frac{0,022}{u_5};$$

$$M_5 = \frac{0,105}{u_1} + \frac{0,159}{u_2} + \frac{0,018}{u_3} + \frac{0,013}{u_4} + \frac{0,022}{u_5};$$

$$M_6 = \frac{0,632}{u_1} + \frac{0,000}{u_2} + \frac{0,756}{u_3} + \frac{0,501}{u_4} + \frac{0,221}{u_5}.$$

В результате правила запишутся в еще более компактном виде:

d_1 : «Если $X = M_1$, то $Y = F$ »; d_2 : «Если $X = M_2$, то $Y = MF$ »; d_3 : «Если $X = M_3$, то $Y = P$ »;

d_4 : «Если $X = M_4$, то $Y = VF$ »; d_5 : «Если $X = M_5$, то $Y = F$ »; d_6 : «Если $X = M_6$, то $Y = UF$ ».

Для реализации этих правил применим импликацию Лукасевича [6]: $\mu_E(u, j) = \min\{1, 1 - \mu_M(u) + \mu_Y(j)\}$, что позволяет получить 6 нечетких отношений: R_i , $i = 1 \div 6$. В частности, для каждой пары $(u, j) \in U \times J$ правило d_1 трансформируется в нечеткое отношение:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0,8701 & 0,9701 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 0,3874 & 0,4874 & 0,5874 & 0,6874 & 0,7874 & 0,8874 & 0,9874 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 0,9588 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 0,6827 & 0,7827 & 0,8827 & 0,9827 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 0,8946 & 0,9946 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \end{pmatrix}.$$

В результате пересечения таких отношений R_i , $i = 1 \div 6$, получим общее функциональное решение, отражающее причинно-следственную связь между характеристиками маркетинговой среды и степенью ее благоприятствования:

$$R = \begin{pmatrix} 0,8701 & 0,9701 & 0,9870 & 0,9870 & 0,9679 & 0,8679 & 0,7679 & 0,6679 & 0,5679 & 0,4679 & 0,3679 \\ 0,3874 & 0,4874 & 0,5874 & 0,6874 & 0,7874 & 0,7904 & 0,7904 & 0,7904 & 0,7904 & 0,7904 & 1,0000 \\ 0,9588 & 0,9817 & 0,9817 & 0,9441 & 0,8441 & 0,7441 & 0,6441 & 0,5441 & 0,4441 & 0,3441 & 0,2441 \\ 0,6827 & 0,7827 & 0,8827 & 0,9827 & 0,9870 & 0,9870 & 0,8894 & 0,7994 & 0,6994 & 0,5994 & 0,4994 \\ 0,8946 & 0,9777 & 0,9777 & 0,9777 & 0,9777 & 0,9777 & 0,9777 & 0,9777 & 0,9777 & 0,8788 & 0,7788 \end{pmatrix}.$$



Для определения уровня благоприятности маркетинговой среды вуза применим правило композиционного вывода в нечеткой среде: $E_i = G_i \circ R$, $i = 1 \div 5$, где E_i — степень благоприятствования маркетинговой среды i -го вуза, G_i — отображение характеристик маркетинговой среды i -го вуза в виде нечеткого подмножества. Тогда, выбирая композиционное правило в виде $\mu_{E_i}(j) = \max_u \{\min(\mu_{G_i}(u), \mu_R(u))\}$ и, полагая $\mu_{G_i}(u) = 0$ при $u \neq u_i$ и $\mu_{G_i}(u) = 1$ при $u = u_i$, в итоге имеем: $\mu_{E_i}(j) = \mu_R(u_i, j)$, т.е. E_i есть i -я строка матрицы R , представляющая собой нечеткое множество по опорному вектору J .

Тогда степень благоприятствования маркетинговой среды вуза u_1 интерпретируется в виде нечеткого множества:

$$E_2 = \frac{0,87}{0} + \frac{0,97}{0,1} + \frac{0,987}{0,2} + \frac{0,987}{0,3} + \frac{0,968}{0,4} + \frac{0,868}{0,5} + \frac{0,768}{0,6} + \frac{0,668}{0,7} + \frac{0,568}{0,8} + \frac{0,468}{0,9} + \frac{0,368}{1,0}.$$

Для точечной оценки (или дефаззификации) этого множества установим его уровневые множества $E_{1\alpha}$ и вычислим соответствующие им мощности $M(E_{1\alpha}) = \sum x_j/n$. Тогда, в частности, имеем:

- для $0 < \alpha < 0,3679$: $\Delta\alpha = 0,3679$,
 $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 1\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,5$;
- для $0,3679 < \alpha < 0,4679$: $\Delta\alpha = 0,1000$,
 $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 0,9\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,45$;
- для $0,4679 < \alpha < 0,5679$: $\Delta\alpha = 0,1000$,
 $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 0,8\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,40$;
- для $0,5679 < \alpha < 0,6679$: $\Delta\alpha = 0,1000$,
 $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 0,7\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,35$;
- для $0,6679 < \alpha < 0,7679$: $\Delta\alpha = 0,1000$,
 $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 0,6\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,30$;
- для $0,7679 < \alpha < 0,8679$: $\Delta\alpha = 0,1000$,
 $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 0,5\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,25$;
- для $0,8679 < \alpha < 0,8701$: $\Delta\alpha = 0,0022$,
 $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,20$;
- для $0,8701 < \alpha < 0,9679$: $\Delta\alpha = 0,0978$,
 $E_{1\alpha} = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,25$;
- для $0,9679 < \alpha < 0,9701$: $\Delta\alpha = 0,0022$,
 $E_{1\alpha} = \{0,1; 0,2; 0,3\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,20$;
- для $0,9701 < \alpha < 0,9870$: $\Delta\alpha = 0,0169$,
 $E_{1\alpha} = \{0,2; 0,3\}$, $M(E_{1\alpha}) = 0,25$.

Применяя равенство $F(E_i) = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M(E_{i\alpha}) d\alpha$, $i = 1 \div 5$, где $\alpha_{\max}$ — максимальное значение на $E_{1\alpha}$,

в итоге получим искомую точечную оценку нечеткого множества E_1 :

$$F(E_1) = \frac{1}{0,9870} \int_0^{0,9870} M(E_{1\alpha}) d\alpha = (0,5 \cdot 0,3679 + 0,45 \cdot 0,1 + 0,4 \cdot 0,1 + 0,35 \cdot 0,1 + 0,30 \cdot 0,1 + 0,25 \cdot 0,1 + 0,20 \cdot 0,0022 + 0,25 \cdot 0,0978 + 0,20 \cdot 0,0022 + 0,25 \cdot 0,0169) = 0,3936.$$

Аналогичными действиями устанавливаем дефаззифицированные оценки и для остальных вузов: для вуза $u_2 = 0,6556$; $u_3 = 0,3432$; $u_4 = 0,4584$; $u_5 = 0,4890$.

Таким образом, среди рассматриваемых альтернатив наиболее предпочтительным является вуз u_2 , которому соответствует наибольшая точечная оценка (0,6556). Далее по убыванию: u_5 (0,4890), u_4 (0,4584), u_1 (0,3936) и u_3 (0,3432).

4. НЕЧЕТКИЕ ПРАВИЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТНОЙ ПОЗИЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ

Для построения искомых правил наряду с высказываниями (e_1 — e_7), приведенными в постановке задачи, за основу выберем представленную в табл. 3 классификацию конкурентных позиций специальностей на рынке образовательных услуг [20].

При этом анализ высказываний (e_1 — e_7) позволяет выявить три критерия, используемых для оцен-

Таблица 3

Классификация конкурентных позиций специальностей

№	Наименование класса	Признак классификации
01	Лидеры рынка образовательных услуг	Специальность с сильной и улучшающейся конкурентной позицией
02	Претенденты на лидерство	Специальность с сильной и не изменяющейся конкурентной позицией. Специальность со средней и улучшающейся конкурентной позицией
03	Норма	Специальность со средней и не изменяющейся конкурентной позицией
04	«Окопавшиеся» в рыночных нишах	Специальность со слабой и не изменяющейся конкурентной позицией. Специальность со средней и ухудшающейся конкурентной позицией
05	Аутсайдеры рынка образовательных услуг	Специальность со слабой и ухудшающейся конкурентной позицией

Таблица 4

Переменные системы нечеткого логического вывода

Входные лингвистические переменные	x_1	Имя переменной	PDC_{ij}
		Терм-множества	МАЛАЯ, СРЕДНЯЯ, БОЛЬШАЯ
		Универсум	[0, 1]
	x_2	Имя переменной	ΔPDC_{ij}
		Терм-множества	УМЕНЬШАЮЩАЯСЯ, НЕИЗМЕННАЯ, ВОЗРАСТАЮЩАЯ
		Универсум	$[-90^\circ, 90^\circ]$
Выходная лингвистическая переменная	y	Имя переменной	Занимаемая позиция (на рынке образовательных услуг)
		Терм-множества	АУТСАЙДЕР, ПОЗИЦИОНИРУЕТСЯ НА НИЗКИХ НИШАХ, СЕРЕДНЯК, ПРЕТЕНДЕНТ НА ЛИДЕРСТВО, ЛИДЕР
		Универсум	[0, 1]

ки позиции j -й специальности i -го вуза на рынке образовательных услуг: $x_1 - PDC_{ij} = KB_{ij} / \sum_{i=1}^n KB_{ij}$, $j = 1, 2, \dots$, где PDC_{ij} — рыночная доля i -го вуза по j -й специальности, KB_{ij} — количество выпускников i -го вуза, трудоустроенных по j -й специальности; $x_2 - \Delta PDC_{ij}$ (тенденция изменения PDC_{ij}); y — позиция вуза. Для удобства эти критерии со всеми необходимыми атрибутами упорядочим в виде табл. 4.

Таким образом, высказывания $e_1 - e_7$ примут более компактный вид:

- e_1 : «Если x_1 = большая и x_2 = увеличивается, тогда y = лидер»;
- e_2 : «Если x_1 = большая и x_2 = неизменная, тогда y = претендент на лидерство»;
- e_3 : «Если x_1 = средняя и x_2 = увеличивается, тогда y = претендент на лидерство»;
- e_4 : «Если x_1 = средняя и x_2 = неизменная, тогда y = середняк»;
- e_5 : «Если x_1 = малая и x_2 = неизменная, тогда y = позиционируется на низких нишах»;
- e_6 : «Если x_1 = средняя и x_2 = уменьшается, тогда y = позиционируется на низких нишах»;
- e_7 : «Если x_1 = малая и x_2 = уменьшается, тогда y = аутсайдер».

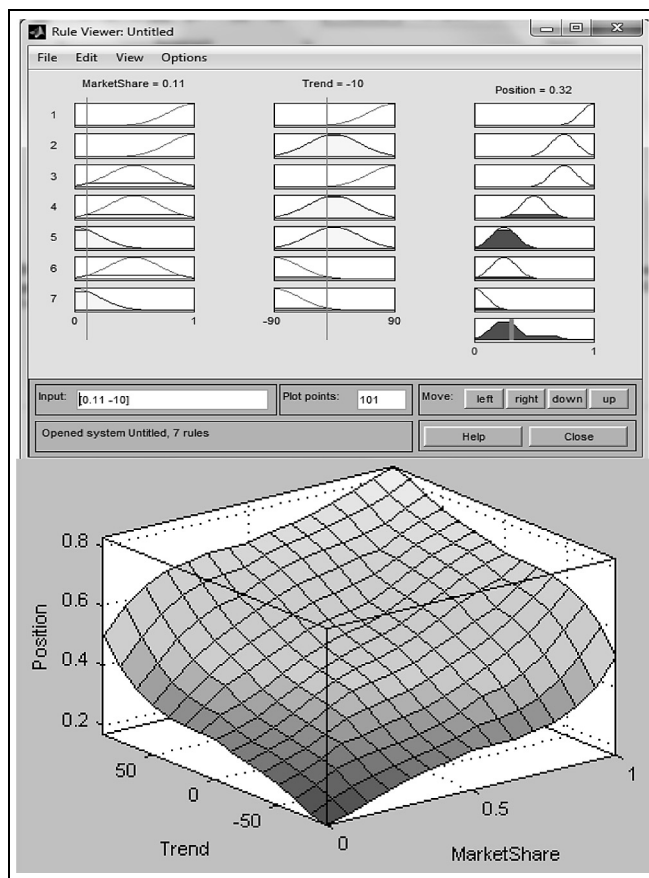
5. ОЦЕНКА КОНКУРЕНТНОЙ ПОЗИЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ ВУЗА

Пусть в результате анализа рыночных долей PDC_{ij} вузов u_i по j -й специальности, $i = 1 \div 5$; $j = 1, 2, \dots$, и изучения картосхемы состояния конкурентной ситуации на рынке образовательных услуг получены соответствующие данные (табл. 5). Тогда реализацию правил ($e_1 - e_7$) осуществим в нотации MATLAB\Fuzzy Inferences System (рис. 1), где для фаззификации входов и выходов используем функции принадлежности гауссова типа.

В результате проведенных симуляций получены искомые точечные оценки конкурентных позиций образовательных услуг: для вуза $u_1 - 0,478$, $u_2 - 0,416$, $u_3 - 0,354$, $u_4 - 0,437$ и $u_5 - 0,320$.

6. ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВУЗОВ И ИХ РАНЖИРОВАНИЕ

Для оценки конкурентоспособности вузов переменные искомой модели упорядочим в виде табл. 6.


Рис. 1. Реализация правил ($e_1 - e_7$) в нотации MATLAB\Fuzzy Inferences System



Причинно-следственные связи сформулируем в виде набора тривиальных логических правил:

r_1 : «Если x_1 = НЕБЛАГОПРИЯТНАЯ и x_2 = АУТСАЙДЕР, тогда y = НИЗКИЙ»;

r_2 : «Если x_1 = БЛАГОПРИЯТНАЯ и x_2 = ПОЗИЦИОНИРУЕТСЯ НА НИЗКИХ НИШАХ РЫНКА, тогда y = НИЖЕ СРЕДНЕГО»;

r_3 : «Если x_1 = БОЛЕЕ ЧЕМ БЛАГОПРИЯТНАЯ и x_2 = СЕРЕДНЯК, тогда y = СРЕДНИЙ»;

r_4 : «Если x_1 = ОЧЕНЬ БЛАГОПРИЯТНАЯ и x_2 = ПРЕТЕНДЕНТ НА ЛИДЕРСТВО, тогда y = ВЫШЕ СРЕДНЕГО»;

r_5 : «Если x_1 = БЕЗУПРЕЧНАЯ и x_2 = ЛИДЕР, тогда y = ВЫСОКИЙ».

Реализация этих правил в нотации MATLAB\Fuzzy Inferences System (рис. 2) на базе промежуточных оценок альтернатив: u_1 , u_2 , u_3 , u_4 и u_5 , дала искомые оценки, которые представлены в табл. 7.

Таким образом, наиболее конкурентоспособным является вуз, у которого наибольшая точечная оценка. Как видно из табл. 7, это вуз u_2 (0,503). Далее по убыванию: u_1 (0,464), u_4 (0,459), u_5 (0,446) и u_3 (0,347).

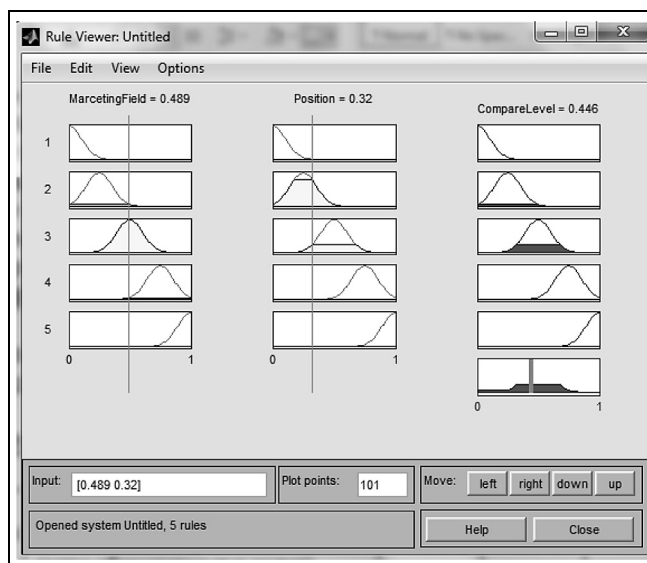


Рис. 2. Реализация правил (r_1 – r_5) в нотации MATLAB\Fuzzy Inferences System

Входные данные модели для оценки конкурентной позиции специальности

Таблица 5

№	Входная переменная	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
01	Рыночная доля вуза по специальности $РДС_{ij}$	0,31	0,25	0,14	0,19	0,11
02	Тенденция изменения $\Delta РДС_{ij}$, град.	25°	10°	5°	30°	–10°

Переменные модели для оценки конкурентоспособности вузов

Таблица 6

Входные лингвистические переменные	x_1	Имя переменной	Маркетинговая среда вуза
		Терм-множества	НЕБЛАГОПРИЯТНАЯ, БЛАГОПРИЯТНАЯ, БОЛЕЕ ЧЕМ БЛАГОПРИЯТНАЯ, ОЧЕНЬ БЛАГОПРИЯТНАЯ, БЕЗУПРЕЧНАЯ
		Универсум	[0, 1]
	x_2	Имя переменной	Занимаемая позиция (на рынке образовательных услуг)
		Терм-множества	АУТСАЙДЕР, ПОЗИЦИОНИРУЕТСЯ НА НИЗКИХ НИШАХ (рынка образовательных услуг), СЕРЕДНЯК, ПРЕТЕНДЕНТ НА ЛИДЕРСТВО, ЛИДЕР
		Универсум	[0, 1]
Выходная лингвистическая переменная	y	Имя переменной	Уровень конкурентоспособности вуза
		Терм-множества	НИЗКИЙ, НИЖЕ СРЕДНЕГО, СРЕДНИЙ, ВЫШЕ СРЕДНЕГО, ВЫСОКИЙ
		Универсум	[0, 1]

Результаты симуляции оценивания уровней конкурентоспособности вузов

Таблица 7

Переменная	Переменные модели	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
Входные переменные	x_1 — маркетинговая среда вуза	0,394	0,656	0,343	0,458	0,489
	x_2 — занимаемая вузом позиция на рынке образовательных услуг	0,478	0,416	0,354	0,437	0,320
Выходная переменная	y — уровень конкурентоспособности	0,464	0,503	0,347	0,459	0,446

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки конкурентоспособности вузов использованы одна адаптированная и две тривиальные системы нечеткого логического вывода, причем последние две реализованы в нотации MATLAB\Fuzzy Inferences System. Адекватность применяемых нечетких моделей можно, конечно, обосновать известной теоремой В. Круглова [21]. Однако понятно, что без полного и исчерпывающего статистического анализа предметной области, подразумевающего детализацию всех факторов воздействия, невозможно получить адекватных результатов. Но это предмет для работы большого коллектива, включающего в себя экономистов, социологов, методистов и пр.

Тем не менее, даже в своей первой итерации статья имеет практическую значимость, которая заключается в том, что предлагаемый нечеткий лингвистический подход к оценке конкурентоспособности вуза на практике может быть применен Министерством образования для ранжирования вузов в масштабе регионального рынка образовательных услуг. В дальнейшем, с учетом детализации всех факторов воздействия, предлагаемая модель могла бы быть полезна при практическом управлении вузом, самооценке конкурентного положения на рынке образовательных услуг, разработке стратегии повышения его конкурентоспособности и программы ее реализации, что могло бы повысить эффективность деятельности вуза и укрепить конкурентное положение на рынке услуг и продукции вуза.

В настоящей статье основное внимание уделено предложенному методу аналитического анализа релевантной информации для оценки конкурентоспособности вузов. К сожалению, все вычисления проведены на основе произвольных данных гипотетических вузов, выбранных из единого правового и административного пространства. Тем не менее, предлагаемый подход предусматривает сравнение конкурентоспособности вузов из разных регионов или даже из разных стран, т. е. рассмотренные модели позволяют сравнительно легко и быстро провести оценку и сравнение любого числа альтернатив из разных правовых и административных пространств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилова Т.В. Бенчмаркинг как современный метод управления конкурентоспособностью вуза // Вестник Чувашского государственного университета. — 2006. — № 6. — С. 354—358.
2. Фатхутдинов Р.А. Управление конкурентоспособностью вуза // Высшее образование в России. — 2006. — № 9. — С. 37.
3. Фатхутдинов Р.А. Конкурентоспособность: экономика, стратегия, управление. — М.: ИНФРА-М, 2000. — 312 с.
4. Юданов А.Ю. Конкуренция: теория и практика. — М.: Гном-Пресс, 1998. — 255 с.
5. Быкова Л.Н. Качество и конкурентоспособность образовательных услуг регионального вуза. — Чебоксары: Изд. дом «Пегас», 2006. — 156 с.
6. Лазарев В.А., Мохначев С.А. Конкурентоспособность вуза как объект управления. — М.: Изд. дом «Пригородные вести», 2003. — 251 с.
7. Багаутдинова Н.Г., Маливанов Н.Н., Ибрагимова А.Н. Формирование системы менеджмента качества отдельного подразделения университета. — М.: РИА «Стандарты и качество», 2006. — 56 с.
8. Марданов М.Дж., Рзаев Р.Р., Джамалов З.Р., Худадова А.К. Оценка конкурентоспособности высшего учебного заведения на основе нечеткого анализа его качественных характеристик // Вестник Азербайджанской инженерной академии. — 2015. — Т. 6, № 2. — С. 117—127.
9. Ахмедов Н.Б. Рейтинги высших учебных заведений Азербайджанской Республики. — Баку: Изд-во АТУ, 2014. — 114 с. (на азерб. яз.).
10. Логинова О.М. Взаимодействие школьного и вузовского образования / Фестиваль педагогических идей «Открытый урок». — URL: <http://festival.1september.ru/articles/524828/> (дата обращения: 06.05.2015).
11. Дивеева Н.В. Основные направления воздействия новых информационных технологий на популяризацию науки // Изв. Южного федерального университета: филологические науки. — 2014. — № 2. — С. 158—168.
12. Гуманитарно-правовой портал PSYERA. — URL: <http://psyera.ru/2660/sostoyanie-ekonomiki> (дата обращения: 06.05.2015).
13. Рзаев Р.Р. Интеллектуальный анализ данных в системах поддержки принятия решений. — М.: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. — 130 с.
14. Яцмирская Р.С., Хохлова Л.Н. Социально-демографическая ситуация в России. — URL: http://www.shemshur.narod.ru/Portfolio/Sv_Dim_school/Old_Age_Problems_1.pdf (дата обращения: 06.05.2015).
15. Политическая система общества. — URL: http://www.vevivi.ru/best/Politicheskaya-sistema-obschestva-refl50517.html#_ftn13 (дата обращения: 06.05.2015).
16. Муратов В.С., Морозова Е.А. Рыночная ориентация вуза: особенности деятельности // Международный журнал прикладных исследований. — 2009. — № 5. — С. 110—111.
17. Современные технологии обучения: общая характеристика, особенности реализации. — URL: <http://www.orenipk.ru/kp/distant/ped/ped/tech.htm> (дата обращения: 06.05.2015).
18. Цыганков В.А. Система управления наукоёмким производством. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. — 88 с.
19. Анненкова И. Рейтинговая оценка деятельности профессорско-преподавательского состава в вузах. — URL: <http://gisap.eu/ru/node/18869> (дата обращения: 07.05.2015).
20. Асаул А.Н., Капаров Б.М. Управление высшим учебным заведением в условиях национальной экономики / Под ред. А.Н. Асаул. — СПб.: Гуманистика, 2007. — 280 с.
21. Круглов В.В. Сравнение алгоритмов Мамдани и Сугено в задаче аппроксимации функции // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. — 2003. — № 5. — С. 70—82.

Статья представлена к публикации членом редколлегии
Ф.Т. Алескеровым.

Марданов Мисир Джумаил оглы — д-р физ. мат. наук,
директор, Институт математики НАН Азербайджана,
✉ misir.mardanov@imm.az,

Рзаев Рамин Рза оглы — д-р техн. наук, профессор,
Институт систем управления НАН Азербайджана,
✉ raminrza@yahoo.com,

Джамалов Зейнал Рамазан оглы — канд. техн. наук, доцент,
Бакинский государственный университет, ✉ zjamalov@mail.ru,

Гасанов Васиф Илкан оглы — ст. преподаватель,
Гянджинский государственный университет, Азербайджан,
✉ vasifgenceli@gmail.com.

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО КРЕДИТНОГО РЫЧАГА В УСЛОВИЯХ МАКСИМИЗАЦИИ ОЖИДАЕМОЙ СКОРОСТИ РОСТА СТОИМОСТИ ПОРТФЕЛЯ

О.И. Кривошеев

Рассмотрена задача управления портфелем на базе портфеля ценных бумаг Марковица, испытывающим независимые случайные приращения логарифма стоимости, описываемые винеровским процессом с трендом и выступающей в качестве безрискового актива наличности. Получены выражение для оптимального кредитного рычага, характеризующего структуру портфеля, оптимальное время или порог коррекции рычага в условиях ненулевых издержек операций с активами. Найдены равновесные доходность актива и рычаг в условиях выравнивания доходностей собственного капитала на всех рынках. Описанный подход адаптирован для предприятий реальной экономики, оптимизирующих свое финансовое состояние. Выведены формулы, описывающие отток капитала.

Ключевые слова: CAPM, винеровский процесс, инвестирование, кредитный рычаг, портфельное инвестирование, акции, случайные блуждания, доходность.

ВВЕДЕНИЕ

Для моделирования инвестиционного процесса крайне важно описать поведение инвесторов по управлению своим финансовым состоянием. В настоящей статье рассматривается класс стратегий [1, 2] инвестирования на бирже, состоящих в поддержании фиксированного соотношения собственных и инвестированных средств (т. е. фиксированного кредитного рычага). Можно также говорить о доле долга в располагаемых средствах, которая взаимнооднозначно связана с кредитным рычагом. Целевым функционалом избирается ожидаемая средняя скорость прироста собственного капитала. Пример такого подхода к инвестированию в индекс Standard & Poor 500 за 2004—2014 гг. (рис. 1) приводит к доходности как функции кредитного рычага, изображенной на рис. 2: оптимум в 7 % годовых достигнут при кредитном рычаге 1,8, т. е. близком к 2.

Видно, что в результате вариации уровня кредитного рычага получается кривая доходности, похожая на параболу (далее будет продемонстрировано, что в некоторых естественных предположениях это должна быть именно параболы). Важно, что оптимальный рычаг или оптимальное финансовое состояние предприятия в данном подходе никак не зависит от рискованных предпочтений инвестора. Более традиционный подход состоит в

формировании оптимального портфеля на основе рассмотрения одновременно множества допустимых альтернатив и предпочтений инвестора, задаваемых, например, функцией полезности. Ряд

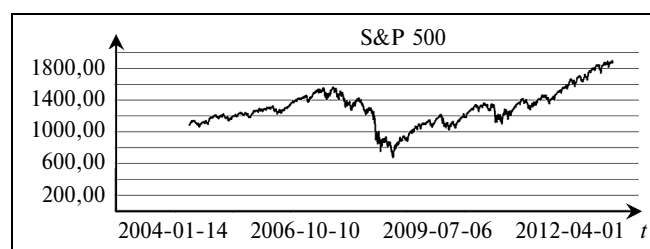


Рис. 1. Изменение индекса Standard & Poor 500 за 2004—2014 гг.

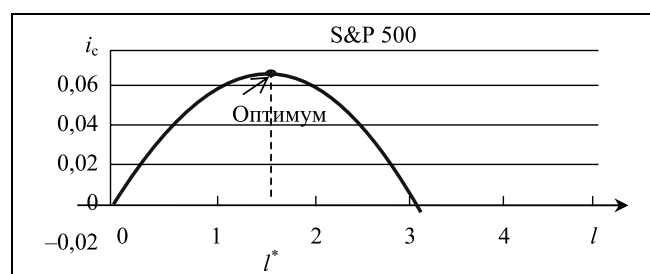


Рис. 2. Зависимость доходности на собственный капитал от кредитного рычага l , который поддерживался постоянным (с учетом изменения котировок) на каждом шаге ряда

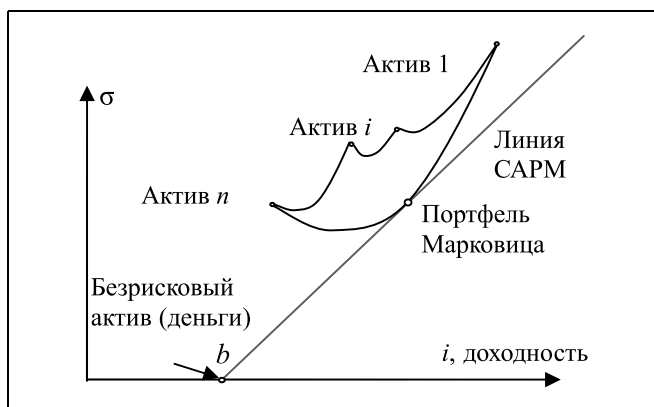


Рис. 3. Зонт Марковица и линия CAPM: углы «зонта» соответствуют рыночным активам, сам зонт — их положительным комбинациям, линия CAPM — Парето-граница комбинаций рыночных активов, смешанных с безрисковым активом — деньгами

положений этого подхода был сформулирован в статье Г.М. Марковица (1952), где впервые предложена модель, ныне известная под его именем. Множество доступных инвестору альтернатив описывалось хорошо известным «зонтом Марковица» (рис. 3), представляющим собой криволинейную область в координатах «волатильность — доходность», своеобразными «шипами» излома границы которой являются отдельные биржевые активы. Внутренние точки этого зонта несколько нетривиально получаются как линейные (выпуклые) комбинации чистых активов, при которых доходности обычным образом усредняются с положительными весами, а волатильности или среднеквадратичные отклонения σ складываются с теми же весами на основе сложения нормально распределенных случайных величин с неединичной матрицей корреляции. Парето-оптимальные портфели образуют «юго-восточную» границу этого множества.

В дальнейшем первоначальная модель была доработана Д. Трейнером и У. Шарпом путем введения важного дополнительного безрискового актива с доходностью $i = b$ и нулевым отклонением $\sigma = 0$. В роли актива выступали американские государственные облигации (деньги). Модель получила название CAPM — Capital Asset Pricing Model [2—11], а множество Парето-оптимальных альтернатив «развернулось» в прямую касательную линию, проходящую через одну — крайнюю — точку «зонта Марковица» и точку $(b, 0)$ — безрискового актива; ее также называют линией CAPM. Точкой касания является так называемый портфель Марковица. И теперь можно считать, что любой Парето-оптимальный портфель состоит из государственных облигаций (т. е. попросту денег) и этого портфеля Марковица. В большинстве работ и учебников также часто предполагают, что портфель Марковица —

это просто вся совокупность торгуемых на бирже бумаг, взятых с их весом, именуемая «индекс».

В настоящей статье предлагается предельно рафинированный подход — мы используем широко популяризированную Блейком и Шоулзом биномиальную модель ценовых блужданий (аппроксимирующую винеровский процесс) для анализа поведения инвестора, максимизирующего математическое ожидание скорости роста собственного капитала (существенно, что нами усреднению подвергается не сам доход, а фактически его нелинейное преобразование — IRR : средний IRR не равен IRR усредненного денежного потока).

Любой исследуемый портфель лежит на линии CAPM и состоит из денег и портфеля Марковица, взятых с весами, в сумме равными единице. Нулевой кредитный рычаг — когда все вложено в государственные облигации/деньги, единичный — когда все вложено в портфель Марковица. Портфели между этими точками имеют положительный рычаг, меньший единицы, портфели на линии CAPM выше портфеля Марковица имеют рычаг, больший единицы (часть денег взята в кредит).

Отличие предлагаемого в данной статье подхода от классической модели Марковица в том, что рассматривается «естественная» целевая функция поведения инвестора, что позволяет сделать более конкретные выводы и вывести определенные лаконичные формулы, полезные для математического моделирования, в частности, формулы доходности и оптимального кредитного рычага. Удается показать, что эти формулы пригодны не только для управления биржевыми активами, но и для управления финансовым состоянием реальных предприятий, что позволяет в дальнейшем (уже вне рамок данного изложения) моделировать динамику оптимального инвестиционного поведения как поддержание кредитного рычага (а также как релаксационное приведение структуры активов к найденному оптимуму) и органично вводить учет инвестиций в моделях экономики типа моделей общего равновесия, добавив к ним новый экзогенный параметр или, в зависимости от модификации, внутреннюю переменную — волатильность.

Структура изложения. Сначала выводится формула оптимального кредитного рычага — оптимального уровня долга. Далее вводятся транзакционные издержки. Это позволяет получить оптимальное время коррекции кредитного рычага, при котором находится компромисс между потерями от отклонения от оптимума уровня долга (кредитного рычага) и потерями от потенциально бесконечных на фрактально-бесконечной броуновской траектории транзакционных издержек.

Затем рассматриваются 100 %-но коррелированные рынки с разной волатильностью и переток капиталов и выводятся формулы для равно-



весного уровня доходности на этих рынках — как уровня, при котором доходность собственного капитала сравнивается со среднемировой.

Тот же подход при известной скорости роста каждого локального рынка позволяет вычислить скорость оттока капитала, требуемую для поддержания местной (локальной) доходности физического капитала и кредитного рычага на равновесном уровне.

Потом обсуждается возможность переноса результатов для финансовых рынков на реальные производственные активы (математически это переход от интеграла к производной). Наконец, выводится несколько вариантов оптимального инвестиционного правила, позволяющего рационально моделировать инвестиционный процесс.

1. ДИСКРЕТНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЦЕН

Принятые обозначения:

i_1 — средняя (ожидаемая) доходность физического капитала актива;

i_c — средняя (ожидаемая) доходность собственного капитала;

$i_c(l)/l$ — удельная рентабельность;

K — основной капитал;

$l = \frac{1}{1-\theta}$ — кредитный рычаг (денежный

мультипликатор);

M — математическое ожидание;

r — риск;

V — приращение (случайное) собственного капитала за период;

δ — конечное отклонение портфеля за время τ , в гауссовом приближении $\delta = \sqrt{\tau}\phi$;

$\Delta = |l - l^*|/l^*$ — отклонение рычага от оптимума;

θ — доля заемных средств — уровень долга;

μ_0 — долгосрочный темп роста экономики;

τ — размер шага дискретной аппроксимации стохастического процесса по времени;

τ^* — оптимальное время пересмотра портфеля в условиях издержек;

ϕ — уровень генерации дисперсии изменения логарифма цен актива в винеровском процессе, приближающем их блуждание — квадрат волатильности;

$*$ — индекс оптимального показателя;

eq — индекс равновесного показателя;

$\tilde{x}$ означает случайную реализацию величины x , например, используются $\tilde{i}$.

Малый инвестор на рынке последовательно видит цены актива $\vec{p}^T = (p_0, p_1, \dots, p_{n-1}, p_n)$. Можно,

но не обязательно, считать, что эти значения равно отстоят на временной оси за суммарное время $T = n\tau$, где τ — интервал между последовательными значениями, n — максимальный индекс последовательности. При стратегии постоянного кредитного рычага действия инвестора таковы. На каждом дискретном шаге t весь собственный капитал C_t плюс $C_t(l-1)$ кредитных средств помещается в актив, актив испытывает непрогнозируемое приращение — изменение цены вверх или вниз, далее все продается (долг погашается), и полученный новый капитал C_{t+1} претерпевает такое же вложение. На практике это не оптимально: при ненулевых издержках взаимно аннулирующиеся транзакции купли-продажи естественно заменить одной транзакцией коррекции рычага: покупкой, если собственный капитал возрос, и продажей в противном случае. Проследим за ростом собственного капитала.

При нулевой ставке процента¹ случайный коэффициент его роста:

$$V_t = lp_{t+1}/p_t - (l-1) \text{ или } V_t = l((p_{t+1}/p_t) - 1) + 1.$$

Целевая функция инвестора состоит в максимизации доходности собственного капитала:

$$i_c(l) = \ln(V_1(l)V_2(l) \dots V_n(l))/T \rightarrow \max.$$

Считается, что $V_k(l) > 0$. Если последнее не выполнено даже в одном случае происходит банкротство инвестора, в связи с чем формально положим его доходность $i_c \rightarrow -\infty$. Величины i_c и V_k являются функциями кредитного рычага, они определены и конечны для каждой положительной последовательности $\vec{p}^T = (p_0, p_1, \dots, p_{n-1}, p_n)$, хотя, в силу условия $\forall k, V_k(l) > 0$, не всюду.

Если итоговая цена выше начальной, а сам ряд немонотонен (см. рис. 1 и 4), легко показать, что функция $i_c(l)$ в области конечных значений унимодальна (см. рис. 2).

Возьмем минимальное отношение последовательных цен $p_{t+1}/p_t < 1$ компонент i_c

$$\ln V_t = \ln[l(p_{t+1}/p_t - 1) + 1],$$

как и i_c в целом, убывает до $-\infty$ при

$$l \rightarrow \frac{1}{1 - p_{t+1}/p_t},$$

¹ При ненулевой ставке процента следует писать несколько сложнее: $V_t = l \frac{p_{t+1}}{p_t} - (l-1)(1+b)$.

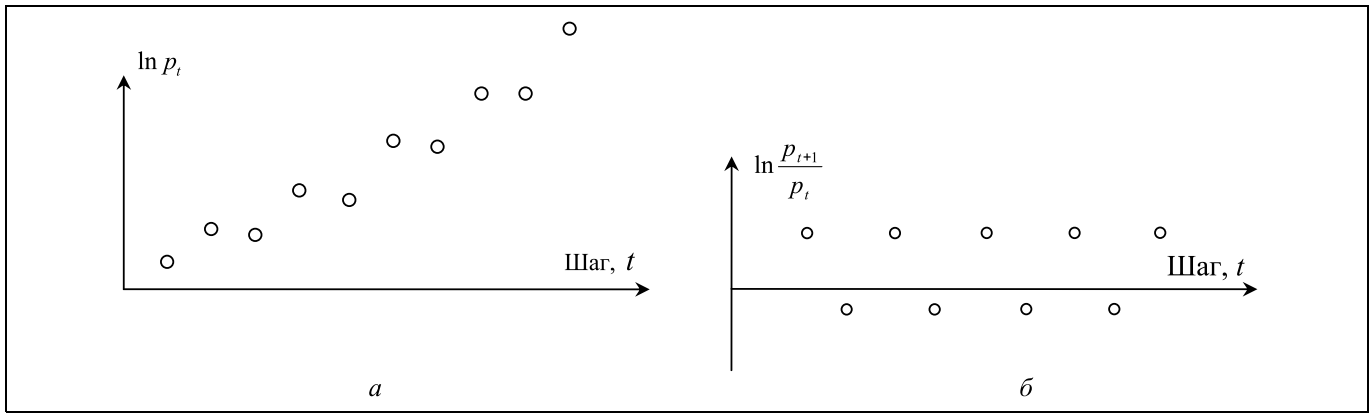


Рис. 4. Произвольная немонотонная последовательность прологарифмированных цен активов (а) и их приращений (б)

производная $i_c(l)$ при $l = 0$ в значительной мере определяется итоговым приращением логарифма цены актива $\ln(p_n/p_0)$, особенно если мы рассматриваем все более мелкие разбиения с $|p_{k+1} - p_k| \ll p_k$, как это имеет место в пределе для непрерывной зависимости $p(t)$. Верно утверждение, что, если $\ln(p_n/p_0) > 0$ и существует t : $(p_{t+1}/p_t < 1)$, то имеется конечный оптимальный кредитный рычаг l^* , максимизирующий доходность стратегии постоянного рычага для данного ряда. Примером такой функции доходности служит изображенная на рис. 2 доходность $i_c(l)$. (Ряд на рис. 1, для которого она посчитана, не монотонен, а конечная цена выше начальной.)

На практике ряд заранее не известен — есть лишь предположения о вероятностях траекторий, поэтому целевая функция должна записываться как математическое ожидание доходности $i_c(l)$ по распределению рядов

$$i_c = [M \ln(V_1 V_2 V_3 \dots V_n)] / (n\tau), \quad (1)$$

где V_i — случайный коэффициент роста собственного капитала, который зависит как от случайных событий, так и от размера рычага l , τ — шаг по времени, n — число шагов.

2. НЕПРЕРЫВНЫЙ ЦЕНОВОЙ РЯД

Если мы имеем непрерывную функцию, например, такую, как изображена на рис. 5, то можно рассмотреть ряд дискретных последовательностей $\vec{p}^T = (p_0, p_1, \dots, p_{n-1}, p_n)$ с увеличивающимся n и уменьшающимся расстоянием τ между последовательными значениями p_k и p_{k+1} . Вызывает интерес существование предела при мелкости таких разбиений, стремящейся к нулю: $\tau \rightarrow 0$.

Легко показать, что для рядов, описываемых гладкими функциями, такая предельная функция $i_c(l)$ будет прямолинейной, с производной $\ln \frac{p_n}{p_0} / T$, где T — длина ряда; т. е. практически полезной содержательной теории построить нельзя, так как максимум либо в нуле, либо на бесконечности. Из практики же известно, что биржевые ряды всюду фрактальны. Наиболее часто предполагают, что ряд описывается винеровским процессом блуждания логарифма цены (броуновским движением с трендом). Для дальнейшего изложения зафиксируем это предположение.

Пусть все компоненты вектора $\vec{p}^T = (p_0, p_1, \dots, p_{n-1}, p_n)$ отстоят на одинаковое время τ . В предположении, что каждое относительное увеличение цены p_{t+1}/p_t актива распределено одинаково и не зависит от предыстории, в выражении (1) можно рассматривать только первый сомножитель:

$$i_c(l) = [M \ln(V_1(l))] / \tau, \quad (2)$$

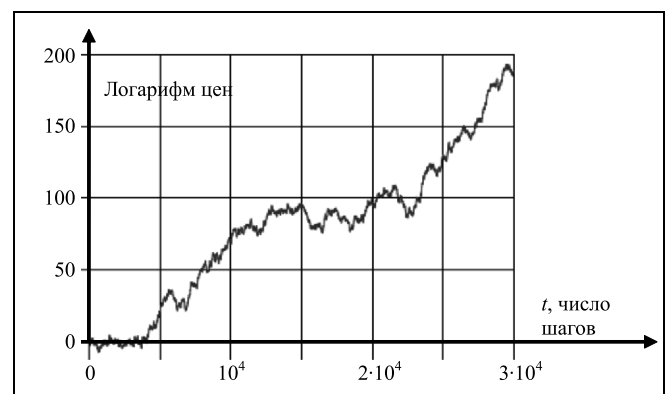


Рис. 5. Логарифм приращения цены актива от времени (в шагах). Винеровский процесс с трендом (случайная траектория)

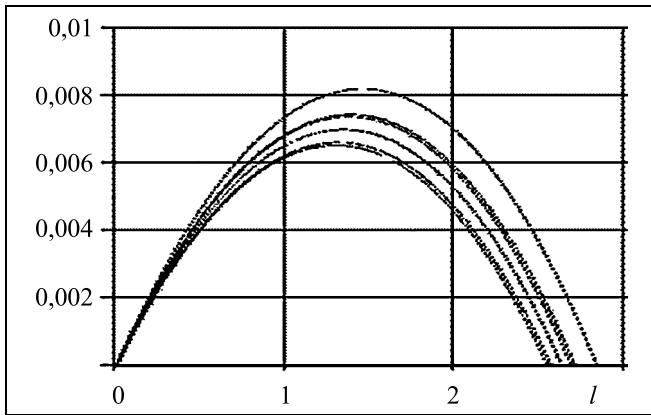


Рис. 6. Экспериментальные зависимости доходности от кредитного рычага (положительная часть) на шести последовательных интервалах винеровской траектории типа изображенной на рис. 5

Величина $\tau i_f = p_{t+1}/p_t - 1$ представляет собой фактическую доходность за один шаг τ , она состоит из тренда $\exp(\tau i_1)$ и зависящего от промежутка τ случайного отклонения $\exp(\delta_{(\tau)})$: $\tau i_f = e^{\tau i_1 + \delta_{(\tau)}}$ откуда $V_t = l - 1 + l e^{\tau i_1 + \delta_{(\tau)}}$.

В данной работе не предполагается возможность потерь кредитора или, по крайней мере, ее учета. Такая ситуация возникает на бирже, когда спекулянт рискует своим резервом: если оценка активов минус долг равна нулю, то активы распродаются, а счет закрывается.

Предваряя формальные выкладки, проведем численный эксперимент. Возьмем несколько реализаций ряда винеровских блужданий логарифма цены (с трендом) типа изображенных на рис. 5, и применим к ним — к каждой реализации по отдельности набор стратегий с поддержанием фиксированного кредитного рычага l . Результаты представлены на рис. 6: доходность отложена по вертикали, кредитный рычаг l по горизонтали.

Как видим, кривые доходности от рычага образуют зависимости, похожие на параболы. Они различаются высотой, но максимизирующий рычаг l^* довольно стабилен. Попробуем теоретически рассчитать значение максимальной доходности i_c^* и аргумент максимума l^* .

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КРЕДИТНОГО РЫЧАГА

При броуновском блуждании нужно максимизировать по l целевую функцию:

$$i_c = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \int_{\mathcal{R}} \ln(l - 1 + e^{\tau i_1 + \delta}) l d\Phi\left(\frac{\delta}{\sqrt{\phi\tau}}\right) \rightarrow \max_{l \in [0; +\infty)},$$

где $\Phi(X)$ — несмещенная функция распределения Гаусса с единичной дисперсией $\phi\tau$ — дисперсия распределения для стоящей под дифференциалом сложной функции. Так как $\ln x \rightarrow -\infty$, $x \rightarrow +0$,

быстрое затухание гауссовой функции плотности распределения существенно для корректности интеграла, который берется по области, где

$l - 1 + e^{\tau i_1 + \delta} l > \varepsilon > 0$ — по области без слишком больших по модулю отрицательных δ , что в линеаризованном случае сводится к условию, в рамках которого мы пренебрежем областью за пределами $2-3\sigma$: $\delta > (\varepsilon - 1)/l + \tau i_1$, $\varepsilon > 0$.

Исходя из допущения, что управлять портфелем можно сколь угодно быстро, подстраиваясь под изменения в рыночной ситуации, воспользуемся простой и наиболее удобной биномиальной моделью процесса, приводящего к броуновскому блужданию, использованной Блейком и Шоулзом. Основываясь на центральной предельной теореме теории вероятности, рассмотрим (порождаемый подбрасыванием симметричной «монеты») дрейф с трендом i_1 и случайным отклонением $\pm\delta$, $\delta = \sqrt{\phi\tau}$, за шаг длины τ . При этом цена актива гарантированно возрастет на τi_1 , а цена портфеля с рычагом l на $\tau i_1 l$, отклонение портфеля составит $\pm\delta l$. Чтобы рассчитать среднюю рентабельность собственного капитала i_c в соответствии с формулой (3), достаточно усреднения коэффициентов приращення при каждом выпадении монеты, генерирующей на микроуровне броуновский процесс.

От процесса блуждания доходности при $V_t = e^{\tau i_1 \pm \delta} \cong 1 + \tau i_1 \pm \delta$ (рис. 7, а) можно перейти к блужданиям при постоянном рычаге (рис. 7, б), где $V_t = 1 + l e^{\tau i_1 \pm \delta} \cong 1 + l \tau i_1 \pm \delta l$ (в линейном приближении) для любого l .

Посчитаем доходность:

$$\begin{aligned} \ln(1 + i_c \tau) &= \frac{1}{2} \ln\{(l \exp(\tau i_1 - \delta) + 1 - l) \times \\ &\times (l \exp(\tau i_1 + \delta) + 1 - l)\} = \frac{1}{2} \ln(l \exp(\tau i_1 - \delta) + 1 - l) + \\ &+ \frac{1}{2} \ln(l \exp(\tau i_1 + \delta) + 1 - l) \end{aligned}$$

или

$$i_c = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \ln\{(l \exp(\tau i_1 + \delta) + 1 - l) \times (l \exp(\tau i_1 - \delta) + 1 - l)\}.$$

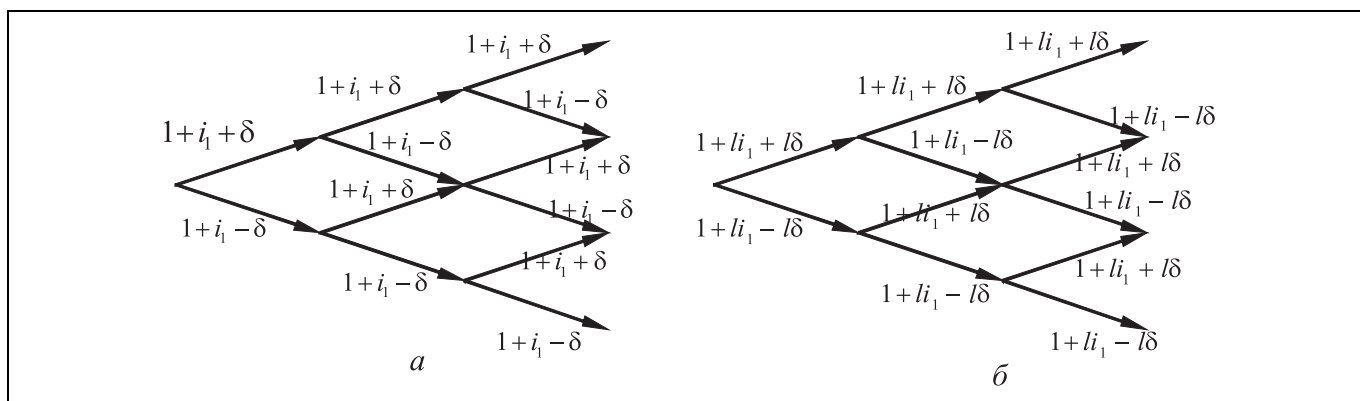


Рис. 7. Блуждания доходности: а — при единичном рычаге; б — при рычаге, поддерживаемом на уровне l

Для удобства от логарифмов можно перейти к степеням, записав

$$i_c = \lim_{\tau \rightarrow +0} \left[\sqrt{(l \exp(\tau i_1 + \delta) + 1 - l)(l \exp(\tau i_1 - \delta) + 1 - l)} - 1 \right] \frac{1}{\tau}.$$

Вычислениям предварим численный расчет. На рис. 8. приведен численный предел функций

$$i_c = \frac{1}{\tau^2} \ln \{ (l \exp(\tau i_1 + \delta) + 1 - l) \times (l \exp(\tau i_1 - \delta) + 1 - l) \}$$

и

$$i_c = \left[\sqrt{(l \exp(\tau i_1 + \delta) + 1 - l)(l \exp(\tau i_1 - \delta) + 1 - l)} - 1 \right] \frac{1}{\tau},$$

при $i_1 = 1$, $\phi = 1$ и достаточно малом τ , когда зависимость от τ не прослеживается, и график параболы $i_c = li_1 - (l^2 - l)\phi/2$.

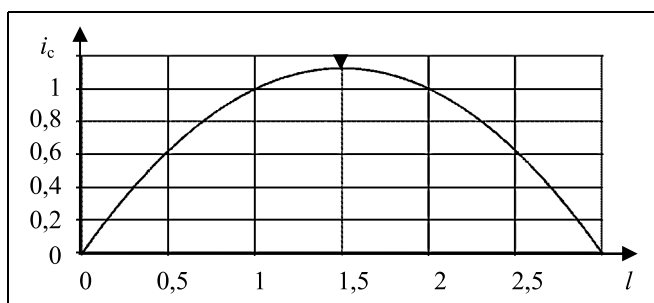


Рис. 8. Кривая средней доходности собственного капитала от рычага l при данных доходности i_1 и темпе генерации дисперсии ϕ ($i_1 = 1$, $\phi = 1$); $l^* = 1,5$ — оптимальный кредитный рычаг

Теоретический расчет сводится к работе с начальными членами рядов Тейлора: раскладывая выражение под корнем до первого порядка по τ , имея в виду, что первый порядок по τ — это второй порядок по δ , ибо $\delta^2 = \tau\phi$, получим последовательно

$$\begin{aligned} 1 + i\tau &= \sqrt{(l \exp(\tau i_1 + \delta) + 1 - l)(l \exp(\tau i_1 - \delta) + 1 - l)} = \\ &= \sqrt{(l(1 + \tau i_1 + \delta + \delta^2/2) + 1 - l) \times} \\ &\rightarrow \times (l(1 + \tau i_1 - \delta + \delta^2/2) + 1 - l) + O(\tau^2) = \\ &= \sqrt{(1 + l(\tau i_1 + \phi\tau/2))^2 - l^2\phi\tau} + O(\tau^2) = \\ &= 1 + \kappa i_1 - (l^2 - l)\phi\tau + O(\tau^2)/2. \end{aligned}$$

Окончательно

$$i_c\tau = \kappa i_1 - (l^2 - l)\phi\tau + o(\tau)/2.$$

Здесь учтено, что в винеровском процессе $\delta^2 = \tau\phi$ и $e^x = 1 + x + x^2/2 + o(x^2)$, $\sqrt{1+x} = 1 + 0,5x + o(x)$, $i_c\tau \cong \kappa i_1 - (l^2 - l)\phi/2$.

Приближенно получим зависимость доходности от кредитного рычага (см. рис. 8):

$$i_c = li_1 - (l^2 - l)\phi/2, \quad (3)$$

откуда максимизирующий доходность рычаг и доходность есть $l^* = i_1/\phi + 1/2$, и $i_c^* = l^{*2}\phi/2$ или $i_c^* = (i_1/\phi + 0,5)^2\phi/2$.

Определим некоторую величину $i_0 = \lim_{l \rightarrow +0} (i_c/l)$ как предел доходности собственного капитала, отнесенной к соответствующему ей кредитному рычагу l :

$$i_0 = \lim_{l \rightarrow +0} \frac{i_c}{l} = \lim_{l \rightarrow +0} \left[i_1 - \frac{1}{2}(l-1)\phi \right] = i_1 + \frac{1}{2}\phi.$$

Практически все формулы с использованием величины i_0 приобретают более лаконичный вид. Например, оптимальный рычаг

$$l^* = i_0/\phi, \quad (4)$$

доходность собственного капитала в оптимуме

$$i_c^* = i_0^2/(2\phi).$$

Обсудим несколько неожиданный результат: при $i_1 = 0$ оптимальная доходность положительна

$i_c^* = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \frac{\phi}{2} > 0$, т. е. даже в отсутствии тренда можно заработать на шумовых блужданиях логарифма цены, если поместить в актив половину собственного капитала, а другую половину в безрисковую наличность.

Рассмотрим биномиальные блуждания с отклонениями e^x и e^{-x} без тренда, когда $i_1 = 0$. При вычисленном выше оптимальном кредитном рычаге $l^* = 1/2$ доходность

$$i_c = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+e^x}{2} \frac{1+e^{-x}}{2}\right) \approx \frac{x^2}{8} > 0$$

— действительно, оказывается положительна.

Отрицательное слагаемое $-\frac{1}{2}(l^2 - l)\phi$ в формуле (3) можно интерпретировать как плату за риск собственного капитала $r = \phi(l - 1)/2$. С такой точки зрения риск физического капитала, определенный как $r_K = r/l$, составит $r_K = \phi(l - 1)/2$. Отметим также что, при $l \gg 1$ формулы с использованием как i_1 , так и i_0 асимптотически совпадают.

4. СЛУЧАЙ МНОГИХ АКТИВОВ ИЛИ РЕГИОНОВ С СИНХРОННЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЦЕН

Теперь рассмотрим разные активы, синхронно меняющие свою стоимость, причем амплитуда колебаний цен на разных рынках разная. В интерпретации реального сектора, это могут быть также разные регионы, в которых синхронно меняются цены, в том числе цены на экспортный товар. Рассмотренные формулы позволяют для каждого региона с его собственными параметрами ϕ_r и i_{1r} (здесь r — индекс региона) вычислить оптимальный рычаг l_r^* и соответствующую ему рентабельность собственного капитала i_{cr}^* :

$$i_{cr}^* = \frac{i_0^2}{2\phi} \text{ или } i_{cr}^* = \left(\frac{i_1}{\phi} + 0,5\right)^2 \frac{\phi}{2}.$$

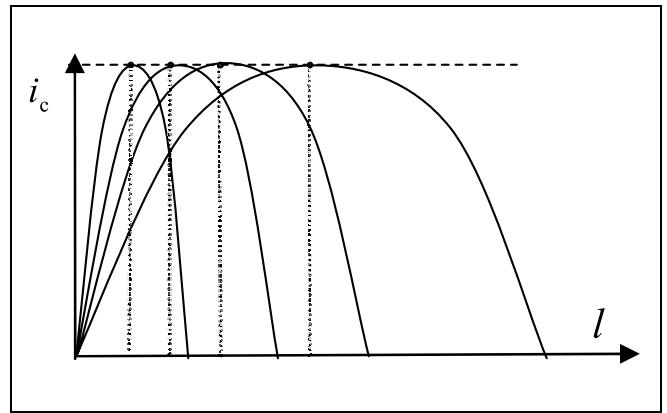


Рис. 9. Долгосрочная перспектива — семейство кривых доходности собственного капитала при разных уровнях ϕ в предположении (после) выравнивания доходности собственного капитала: линия максимумов — прямая

Очевидно, инвесторы, решая, куда вложить свои денежные средства, смогут выбирать регион или рынок с максимальной доходностью, что приведет к выравниванию доходности в разных секторах экономики и регионах, таким образом, возникнет новая «мировая константа» i_c . При этом пики всех кривых доходностей для разных ϕ_r образуют одну горизонтальную прямую (рис. 9).

При всюду одинаковой доходности собственного капитала i_c доходность актива и кредитный рычаг должны быть

$$i_{0eqr} = \sqrt{2\phi_r i_c},$$

$$i_{1eqr} = i_{0eqr} - \phi_r/2 = \sqrt{2\phi_r i_c} - \phi_r/2,$$

$$l_{eqr} = \sqrt{2i_c/\phi_r}.$$

5. ЧАСТОТА КОРРЕКЦИИ ОПТИМАЛЬНОГО КРЕДИТНОГО РЫЧАГА

Рассчитаем оптимальное время управления портфелем для случая ненулевых издержек изменения портфеля. Поскольку длина траектории броуновского движения между любыми двумя точками бесконечна, то при сколь угодно малом, но ненулевом уровне комиссии γ попытка корректировать любые сколь угодно малые отклонения от оптимального рычага будет приводить к бесконечным издержкам. Очевидно, их корректировать надо либо по достижении определенного отклонения $\Delta l = |l - l^*|$, либо, что почти то же самое, через определенное время τ . Перепишем доходность собственного капитала как разложение по степе-

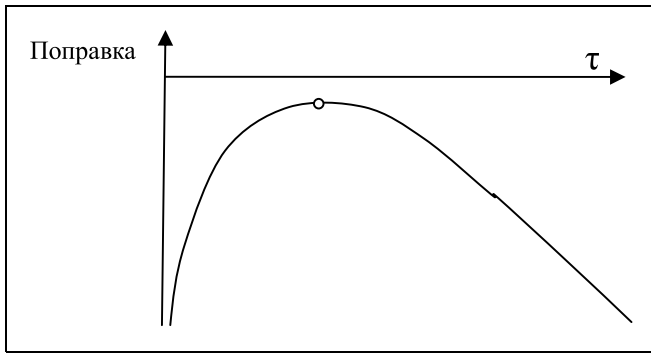


Рис. 10. Отрицательная поправка к доходности собственного капитала, обусловленная издержками γ в зависимости от порога пересмотра портфеля (в зависимости от характерного времени реакции τ)

ням $(l - l^*)$, где l^* — значение кредитного рычага в максимуме доходности:

$$i_c = li - \phi l^2/2 = \text{const} - \phi(l - l^*)^2/2 = \\ = i_{c0} - \phi(l - l^*)^2/2,$$

где $i_{c0} = i_0 l^*/2$.

Разовые издержки коррекции $\gamma|l - l^*|$ надо разделить на время между коррекциями, чтобы учесть со знаком минус в формуле для доходности:

$$i_c = i_c - \phi(l - l^*)^2/2 - \gamma|l - l^*|/\tau.$$

Новый кредитный рычаг — это отношение размера активов $l^*(\sqrt{\phi\tau} + 1)$ за время τ к приросту собственного капитала за этот же период $1 + \sqrt{\phi\tau} l^*$. Значит, изменение кредитного рычага

$$|l - l^*| \approx |l^* - l^*(\sqrt{\phi\tau} + 1)/(1 + \sqrt{\phi\tau} l^*)| \approx \\ \approx |l^* - l^{*2}| \sqrt{\phi\tau} = l^*|l^* - 1| \sqrt{\phi\tau},$$

откуда $i_c = \mu_0/2 - \phi l^{*2}|l^* - 1|^2 \phi \tau/2 - \gamma l^*|l^* - 1| \sqrt{\phi}/\sqrt{\tau}$ — если акцентироваться на зависимости от управляемого нами времени τ , это функционал вида $i_c = C - B\tau - A/\sqrt{\tau}$ (рис. 10), где A , B и C не зависят от τ .

Для нахождения максимума доходности продифференцируем по τ полученное выражение для доходности и приравняем производную к нулю:

$$\frac{d}{d\tau} i_c = -\frac{\phi}{2} l^{*2}|l^* - 1|^2 \phi + \frac{1}{2} \gamma l^*|l^* - 1| \sqrt{\phi} \frac{1}{\tau^{3/2}} = 0,$$

$$\text{откуда } \tau^{3/2} = \frac{\gamma}{|l^* - 1|^2 \sqrt{\phi\phi}} \text{ и } \tau^* = \frac{\gamma^{2/3}}{|l^* - 1|^{2/3} l^{*2/3} \phi}.$$

Если оптимальное правило должно быть указано в терминах относительного отклонения, то пор-

тфель должен пересматриваться при достижении относительным отклонением от оптимума $|l - l^*|/l^*$ величины Δ^* :

$$\Delta^* = |l - l^*|/l^* = |l^* - 1| \sqrt{\phi} \left(\frac{\gamma^{2/3}}{|l^* - 1|^{2/3} l^{*2/3} \phi} \right)^{1/2} = \\ = \gamma^{1/3} \frac{|l^* - 1|^{2/3}}{l^{*1/3}}.$$

С учетом соотношений (см. § 6) $\phi l^{*2} = i_0 l^* = \mu_0$

и выравнивания доходности $l_{eq} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\phi}}$, $i_{0eq} = \sqrt{\mu_0 \phi}$

$$\tau^* = \frac{\gamma^{2/3}}{|l^* - 1|^{2/3} l^{*2/3} \phi} = \frac{\gamma^{2/3} l^{*2/3}}{|l^* - 1|^{2/3} \mu_0^{2/3} \phi^{1/3}},$$

$$\Delta^* = |l - l^*|/l^* = \gamma^{1/3} \frac{|l^* - 1|^{2/3}}{l^{*1/3}} = \left| \sqrt{\frac{\mu_0}{\phi}} - 1 \right|^{2/3} \gamma^{1/3} \frac{\phi^{1/6}}{\mu_0^{1/6}},$$

$$|l - l^*| = l^{*2/3} |l^* - 1|^{2/3} \gamma^{1/3} = \left| \sqrt{\frac{\mu_0}{\phi}} - 1 \right|^{2/3} \gamma^{1/3} \frac{\mu_0^{1/3}}{\phi^{1/3}}.$$

Если пренебречь единицей при большом рычаге $l^* \gg 1$, то оптимальное время пересмотра $\tau^* = \gamma^{2/3}/(\phi^{1/3} \mu_0^{2/3})$, соответствующий порог коррекции для относительного отклонения

$$\frac{|\Delta l|}{l^*} = \frac{\gamma^{1/3} \phi^{1/6}}{\mu_0^{1/6}}.$$

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ В РЕАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

В дальнейшем модель может быть использована для обобщения статической модели Вальраса [1] в формате введения в последнюю инвестиций.

На основе уравнения изменения логарифма рычага $\frac{d}{dt} \ln l = -il + \mu$ (где $\mu = \frac{d}{dt} \ln K$, см. § 10) может быть сформулировано оптимальное инвестиционное правило $\mu = il$, если кредитный рычаг уже в равновесии, и $\mu = il + \frac{d}{dt} \ln l$, если кредитный рычаг почему-либо подвергнется отклонению.

Заменой² $\frac{d}{dt} \ln l \rightarrow \frac{1}{\tau} (l - l^*)$ (релаксационный член, моделирующий стремление экономических

² Отметим, что в этой формуле релаксационный член можно поделить на l , получив $\frac{d}{dt} \ln l = \frac{1}{l\tau} (l - l^*)$ или $\frac{d}{dt} l = \frac{1}{\tau} (l - l^*)$.

агентов привести рычаг к оптимальному) и подстановкой $\mu = \frac{d}{dt} \ln K$ получаем

$$\frac{d}{dt} \ln K = il + \frac{1}{\tau} (l - l^*),$$

τ — время релаксации (отождествляемое нами с рассчитанным выше временем $\tau^* = \frac{\gamma^{2/3}}{|l^* - 1|^{2/3} l^{*2/3} \phi}$).

Этой скорости изменения капитала соответствует объем инвестиций I , пропорциональный $\mu + d$, где d — скорость выбытия фондов.

Имеем (в расчете на единицу капитала): $\frac{I}{K} = \left(d + il + \frac{1}{\tau} (l - l^*)\right) p_K$. В отсутствии перетока капитала также может быть использовано выражение (4) и формулы

$$\frac{d}{dt} \ln K = \tilde{i}_1 l + \frac{1}{\tau} \left(l - \frac{i_0}{\phi}\right)$$

или

$$\frac{d}{dt} \ln K = \tilde{i}_1 l + \frac{1}{\tau} \left(l - \frac{1}{2} - \frac{i_1}{\phi}\right).$$

7. ВРЕМЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЫЧАГА

Ранее мы анализировали отклонение рычага l от точно известного рычага l^* . Для измерения величин i_1 и ϕ при достаточном объеме данных могли бы быть задействованы статистические тесты, однако реальные ряды не подчиняются предположениям модели винеровского процесса. Но кривая $i_c(l)$ определена для любой реализации ряда — независимо от модели, и оптимальный рычаг может быть измерен по достаточно большой предыстории, как это показано на рис. 2 для ряда S & P 500, приведенного на рис. 1. На реальном рынке тенденции постоянно изменяются, как видно на том же рис. 1. Если подвергается отклонению оптимальный рычаг, все должно определяться временем, на котором можно детектировать это отклонение.

Для простоты считаем, что нам нужно детектировать изменение i_1 от начального значения $i_{1н}$, которое скачком превращается в конечное значение $i_{1к}$. По существу нам надо сравнить отклонение тренда $(i_{1н} - i_{1к})T_{откл}$ и среднее отклонение, обусловленное шумом $\sqrt{T_{откл} \phi}$ (которое доминирует на малых временах).

Первое из них превзойдет второе после того, как они впервые сравниваются при

$$T_{откл} = \frac{\phi}{(i_{1н} - i_{1к})^2}.$$

Для простоты полагая одну из этих величин равной нулю, получим время, на котором метод позволяет детектировать изменение i_1 на 100 % (т. е. на величину порядка самой себя), $T_{откл} = \phi / i_1^2 = 1 / (2i_c)$, т. е. длина ряда, по которому нашим методом может быть измерен оптимальный рычаг не может быть меньше $\tau_2 = 1 / i_c^*$. Для ситуации, представленной

на рис. 2, это $\tau_2 = \frac{1}{2 \cdot 0,07 \text{ год}^{-1}} \approx 7$ лет, что лишь немного меньше 10 лет — длины ряда на рис. 1.

Это второе естественное характерное время при принятии инвестиционных решений. В формуле $\frac{d}{dt} \ln K = il + \frac{1}{\tau} (l - l^*)$ теперь либо рычаг $l^* = \arg \max_{l>0} i_c(l)$, измеренный по предыстории при-

мерной длины i_c^{-1} , либо можно предложить идейно аналогичную формуле (2) схему со скользящим пересчетом кривой доходности

$$i_c(l) := i_c^* \ln V_\tau(l) + i_c(l)(1 - \tau i_c^*),$$

где $i_c^* = \max_{l>0} i_c(l)$ — оптимальная скорость роста собственного капитала, τ — шаг расчета (он может совпадать с τ^*), $V_\tau(l)$ — приращение собственного капитала за интервал длины τ , τi_c^* — параметр скользящего среднего, отвечающий характерному времени равному i_c^{*-1} .

Как показано в § 9 параметр ϕ также можно интерпретировать через отклонение рентабельности реального актива $\phi = \tau_0 \Delta i^2$ (рис. 11), где Δi — отклонение рентабельности реального актива, τ_0 — характерное время отклонения (его можно назвать временем корреляции).

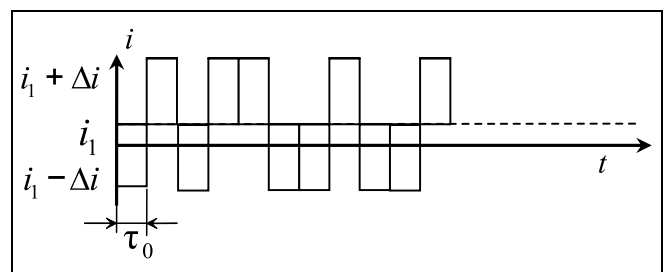


Рис. 11. Рентабельность в зависимости от порога реакции (в зависимости от характерного времени реакции)

8. РАСЧЕТ ПЕРЕТОКА КАПИТАЛА

При выравнивании доходности ввиду возможности перетока в среднем $\frac{d}{dt} \ln K = \vartheta$, где ϑ — средняя скорость роста рыночной ниши данной отрасли. Поскольку не весь капитал инвестируется в данном секторе, то появляется уравнение, описывающее межсекторный, межрегиональный и межстрановой переток инвестиций. Из условия $2i_c = \mu_0$, где μ_0 — темп роста глобальной экономики, оптимальный рычаг определяется как $l_{eq}^* = \sqrt{\mu_0/\phi}$.

Доходность на капитал $i_{eq} \cong \sqrt{\mu_0\phi}$ (точная формула $i_{1eq} = \sqrt{\mu_0\phi} - \phi/2$, см. § 10, формула 16).

Тогда усредненный отток капитала с единицы физического капитала K измеряется как разность средней доходности и скорости роста: $c_K = i_1^* - \vartheta \cong \sqrt{\mu_0\phi} - \vartheta$. (Отрицательный знак этой величины будет означать приток капитала от внешних инвесторов в экономику.)

Если умножим его на стоимость активов $p_K K$, то получим полный отток капитала:

$$C = p_K K c_K = (i^* - \vartheta) p_K K \cong (\sqrt{\mu_0\phi} - \vartheta) p_K K.$$

Отметим, содержательное заключение состоит в том, что для борьбы с оттоком капитала правительство должно проводить стабилизационную политику — снижать параметр $\phi = \tau_0 \Delta i^2$ или обеспечивать экономический рост, в частности, посредством защиты рынка.

В более точном варианте отток капитала

$$C = p_K K c_K = (\sqrt{\mu_0\phi} - \phi/2 - \vartheta) p_K K.$$

9. ПРИМЕНЕНИЕ К РЕАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Ключом перехода к реальной экономике служит осознание факта, что рентабельности биржевого и реального активов соотносятся как интеграл и производная. Воспользуемся ступенчатой моделью ряда рентабельности. С равной вероятностью 0,5 IRR принимает значение $i_1 + \Delta i$ или $i_1 - \Delta i$ (см. рис. 11).

Рассмотрим завод без долга. Реинвестируя всю прибыль, создадим фиктивный «биржевой» актив, растущий как $K(t) = K(t_0) \exp[(t - t_0)i]$ при постоянной рентабельности i и как $K(t) = K(t_0) \exp \int_{t_0}^t i(t) dt$

при переменной $i(t)$. При случайных и независимых пиках высоты $i_1 + \Delta i$ или $i_1 - \Delta i$ и длины τ_0 рост (логарифма) цен этого актива описывается броуновским процессом с $\phi = \tau_0 \Delta i^2$, после чего могут быть применены все выведенные формулы.

10. ИНВЕСТИЦИОННОЕ ПРАВИЛО И ДОЛГОСРОЧНЫЙ ТЕМП РОСТА ЭКОНОМИКИ

Рассмотрим размер удельного долга $\theta = D/(p_K K)$, где D — долг, в зависимости от номинальных или реальных инвестиций $\mu = \frac{1}{K} \frac{dK}{dt} : \frac{d}{dt} \theta = -\tilde{i}_1 + (1 - \theta)\mu$

или $\frac{d}{dt} \ln l = -\tilde{i}_1 l + \mu$. Считается что цена фондов p_K неизменна.

Вывод требует расчета производной удельного долга $\frac{1}{p_K} \frac{d}{dt} \frac{D}{K}$ и некоторых преобразований, в

основе которых лежат соотношения $\frac{d}{dt} D = I - F$,

$$F = (i + d) p_K K, \quad \frac{d}{dt} K = \frac{I}{p_K} - dK. \quad \text{Поскольку } l = \frac{1}{1 - \theta},$$

то $\frac{d}{dt} \ln l = \frac{1}{1 - \theta} \frac{d}{dt} \theta$, где d — скорость выбытия, I — инвестиции.

Если μ_0 — трендовая скорость роста экономики, то в равновесии $0 = -i_1 l + \mu_0$, где также i_1 — средняя рентабельность, получим $i_1 l^* = \mu_0$ и $\mu_0 = 2i_c$, откуда $l_{eq}^* = \sqrt{\mu_0/\phi}$, $i_{0eq} = \sqrt{\mu_0\phi}$. С учетом соотношения $i_1 = i_0 - \phi/2$ получим

$$i_{1eq} = \sqrt{\mu_0\phi} - \phi/2. \quad (5)$$

Впрочем, для удобства может оказаться целесообразно пользоваться приближенной формулой

$$i_{1eq} \approx i_{0eq} = \sqrt{\mu_0\phi}. \quad (6)$$

Для моделирования реальной экономики бывает очень полезно применять поддерживающее фиксированный рычаг инвестиционное правило $\mu(t) = i(t)l^*$ или, что то же,

$$\frac{d \ln K}{dt} = i(t)l^*.$$

Оно задает мгновенный инвестиционный спрос вашей модели, который начнет явно зависеть от вектора цен после представления текущей рентабельности функцией этого вектора.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Для наиболее примитивного, но универсального предположения о характере изменения (логарифма) цен на рынке (винеровский процесс с трендом) рассчитан оптимальный в смысле максимизации скорости роста (рентабельности) алгоритм управления портфелем. Рассчитан оптимальный рычаг $l^* = i_0/\phi$ и соответствующая ему доходность $i_c^* = i_0^2/(2\phi)$.

В долгосрочном равновесии после выравнивания доходности с учетом равенств $il = \mu_0 = 2i_c$ (см. § 10) получили $l = \sqrt{\mu_0/\phi}$, $i = \sqrt{\mu_0\phi}$.

В условиях транзакционных издержек на коррекцию рычага при «сверхдлинном рычаге» коррекцию оптимально осуществлять через время

$$\tau = \gamma^{2/3}/(\phi^{1/3}\mu_0^{2/3}) \text{ или } \tau = \gamma^{2/3}/(l^{*4/3}\phi)$$

или при переходе порога относительного отклонения

$$\frac{|\Delta l|}{l^*} = \frac{\gamma^{1/3}\phi^{1/6}}{\mu_0^{1/6}} \text{ или } \Delta = |l - l^*|/l^* = \gamma^{1/3}l^{*1/3}.$$

Эти формулы (асимптотические, $l^* \rightarrow \infty$) оптимального порога отклонения (времени коррекции) очевидно не логичны при $l^* = 1$ — потому при малых рычагах в диапазоне $0 \leq l \leq 2$, может быть и чуть выше, надлежит пользоваться более точными формулами:

$$\tau^* = \frac{\gamma^{2/3}}{|l^* - 1|^{2/3} l^{*2/3} \phi} = \frac{\gamma^{2/3} l^{*2/3}}{|l^* - 1|^{2/3} \mu_0^{2/3} \phi^{1/3}},$$

$$\Delta = |l - l^*|/l^* = \gamma^{1/3} \frac{|l^* - 1|^{2/3}}{l^{*1/3}} = \left| \sqrt{\frac{\mu_0}{\phi}} - 1 \right|^{2/3} \gamma^{1/3} \frac{\phi^{1/6}}{\mu_0^{1/6}},$$

$$|l - l^*| = l^{*2/3} |l^* - 1|^{2/3} \gamma^{1/3} = \left| \sqrt{\mu_0/\phi} - 1 \right|^{2/3} \gamma^{1/3} \frac{\mu_0^{1/3}}{\phi^{1/3}}.$$

Чтобы применить вторые варианты формул, следовало бы проверить предположения $l^* = \sqrt{\mu_0/\phi}$, $i^* = \sqrt{\mu_0\phi}$, невыполнение которых может указывать на неадекватность модели, пере- или недооцененность активов, неравновесие, в том числе надувание ценового пузыря. Также надлежит проконтролировать и винеровский характер приращения (логарифмов) цен активов.

При моделировании инвестиционного поведения в реальной экономике могут понадобиться инвестиционные правила, сохраняющие кредитный рычаг вида $\frac{d}{dt} \ln K = i(t)l^*$, и его обобщение на случай

$$\text{отклонения от оптимума: } \frac{d}{dt} \ln K = i(t)l^* + \frac{1}{\tau}(l - l^*),$$

где $\tau = \tau^*$. Также следует иметь в виду, что для измерения трендового показателя i_1 или оптимального рычага l путем максимизации доходности $i_c(l) := V_\tau(l)/T + i_c(l)(1 - \tau/T)$ с погрешностью менее 100 % потребуется время $T \geq 1/i_c^*$.

Замечание по методологии исследования. Существенный момент заключается в том, что операция усреднения применялась не к сумме дохода с последующим расчетом IRR — рентабельности, а к распределению уже рассчитанных значений IRR. Для броуновского движения это означает максимизацию медианного дохода, который (в этой постановке) совпал со средней доходностью. Перестановка расчета IRR и операции усреднения (когда усреднение сперва применяется к доходу) приведет к радикально новым выводам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривошеев О.И. Построение обобщенной модели Вальраса с инвестициями на базе оптимизации рациональными инвесторами кредитного рычага // Тез. докл. седьмой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2013. — М., 2013. — С 195—198.
2. Шарп У.Ф., Александер Г.Дж., Бейли Дж. — Инвестиции: пер. с англ. — М.: Инфра-М, 1997.
3. Шапкин А.С. Экономические и финансовые риски. Оценка, управление, портфель инвестиций. — М.: Юнити, 2003.
4. Black Fischer, Jensen M.C., and Scholes M. The Capital Asset Pricing Model: Some Empirical Tests, P. 79—121 in M. Jensen ed. — URL: <http://www.efalken.com/LowVolClassics/black-jensenscholes.pdf> (дата обращения 9.07.2015).
5. French C.W. The Treynor Capital Asset Pricing Model // Journal of Investment Management. — 2003. — Vol. 1, N 2. — P. 60—72.
6. Markowitz, H.M. The early history of portfolio theory: 1600—1960 // Financial Analysts Journal. — 1999. — Vol. 55, N 4.
7. Sharpe W.F. Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk // Journal of Finance. — 1964. — Vol. XIX, N 3. — P. 425—442.
8. Tobin J. Liquidity preference as behavior towards risk. — URL: <http://dido.wss.yale.edu/P/cm/m19/m19-01.pdf> (дата обращения 9.07.2015).
9. Treynor J.L. Toward a Theory of Market Value of Risky Assets. Unpublished manuscript. A final version was published in 1999, in Asset Pricing and Portfolio Performance: Models, Strategy and Performance Metrics. R.A. Korajczyk (ed.). — London: Risk Books. — P. 15—22.
10. Triana P. Lecturing Birds on Flying: Can Mathematical Theories Destroy the Financial Markets? — N.-Y.: Wiley, 2009. — 400 с.
11. Altman E. Corporate Financial Distress and Bankruptcy: 3rd edition. — N.-Y.: John Wiley and Sons, 2005.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Ключковым.

Кривошеев Олег Игоревич — преподаватель, Московский государственный университет экономики статистики и информатики; науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, okrivosheev@mail.ru, o-krivosheev@ya.ru.

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТОИМОСТЬЮ НЕФТЯНОЙ КОМПАНИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЦЕН НА НЕФТЬ

В.Ю. Коротин, А.М. Ульченков, Р.Т. Исламов

Рассмотрена задача поиска оптимальной валютной структуры долга нефтяной компании в условиях неопределенности цен на нефть с точки зрения максимизации стоимости компании по критерию в форме квантили. Предложен алгоритм поиска гарантирующего (по вероятности) решения задачи и получено решение, максимизирующее стоимость компании.

Ключевые слова: квантильная оптимизация, стохастическая оптимизация, анализ неопределенности, риск-менеджмент.

ВВЕДЕНИЕ

Задача управления стоимостью нефтяной компании давно привлекает внимание исследователей, см., например, работы [1–5]. Помимо основной задачи обеспечения роста производственных показателей, одна из важных составляющих при формировании стоимости компании состоит в эффективном управлении ее капиталом и долговой нагрузкой.

События 2014 года, и прежде всего, введение со стороны США и Евросоюза секторальных санк-

ций, направленных, и на топливно-энергетический комплекс России, стремительное падение цен на нефть в 3–4 кварталах 2014 г. вновь сделали актуальной уже подзабытую с 2008–2009 гг. задачу оптимального планирования деятельности компаний в части структуры долга при относительно высоком уровне закредитованности. Очевидно, что уровень закредитованности любой компании отрицательно сказывается на формировании ее стоимости, однако можно ли выбрать такую структуру долга, которая бы максимизировала стоимость компании на падающем рынке?

Суть оптимизации портфеля — выбор из всевозможных его вариантов такого, который обеспечит наилучший результат при заранее известных критериях (рис. 1). Задача выбора оптимальной структуры портфеля ценных бумаг была впервые комплексно изучена Г. Марковицем [6] и продолжена рядом авторов, см., например, работы [7–9].

В условиях неопределенности входных параметров одним из лучших инструментов для решения подобной задачи служит инструментарий теории вероятностей и стохастических процессов [10]. Отметим, что именно Г. Марковицем в его работе [6] высказана идея о необходимости применения вероятностных методов для решения задач портфельной оптимизации¹.

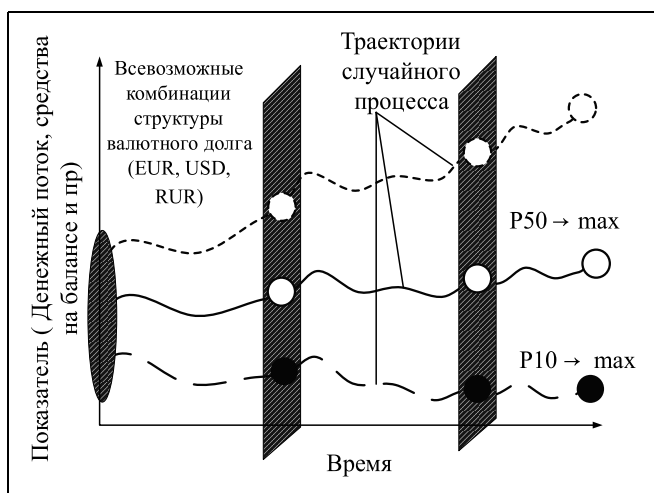


Рис. 1. Подход к оптимизации структуры долгового портфеля

¹ «I believe that better methods, which take into account more information, can be found. I believe that what is needed is essentially a «probabilistic» reformulation of security analysis».

Основной риск для нефтяной компании заключается в падении цены на нефть. Большинство инвесторов и акционеров в своих оценках формируют несколько трендов (сценариев), исходя из разных уровней цены на нефть: «пессимистичный», «базовый» и «оптимистичный». Однако часто забывают, что по трем точкам невозможно построить функцию распределения вероятностей случайной величины (цены на нефть). Отдельная и особо интересная задача состоит в оценке интервалов возможных значений итоговой случайной величины, анализе формы функции распределения и понимании, как форма распределения входных случайных величин влияет на итоговый финансовый результат. В рамках сценарного анализа это совершенно нерешаемая задача.

Каким же образом компания может поставить риски (валютные, риск падения цен на нефть) себе на службу? Заметим, что существует обратная зависимость курса рубля от стоимости нефти, так называемое «естественное хеджирование» — при снижении цены на нефть выпадающие долларовые доходы частично компенсируются повышением рублевых доходов. В какой момент дополнительных рублевых доходов столько, что они смогут компенсировать падение выручки от снижения цены на нефть?

Ответы на эти вопросы может дать оптимизация по квантильному критерию (см. рис. 1), основы которой были заложены в работе [7] и исследованы рядом авторов, в том числе российской теоретической группой А.И. Кибзуна [9]: Ю.С. Кан [10], А.В. Наумов [11], П.В. Григорьев [12] и др.

Для решения задачи по оптимизации авторы построили сначала детерминистическую финансово-экономическую модель компании с ежегодной добычей 1 млн. т нефти. На следующем шаге добавили в нее случайные величины, описывающие макроэкономические параметры в произвольный момент времени t : цену на нефть, курс рубля относительно доллара и др. Подробное описание модели можно найти в работах [14–16]. Уточним, что рассматриваемая компания имеет высокий уровень долга, на начало моделирования показатель долг/Ebitda равен четырем.

Решение данной задачи в аналитическом виде вряд ли возможно (в частности, из-за сложности системы налогообложения в России); ее можно решить исключительно путем анализа, как неопределенность входных параметров влияет на выходные результаты финансово-экономической модели (рис. 2). Устоявшийся англоязычный термин для подобного анализа — «propagation of uncertainty», которому посвящено довольно много работ, см., например, обзор [13]. Несмотря на раз-

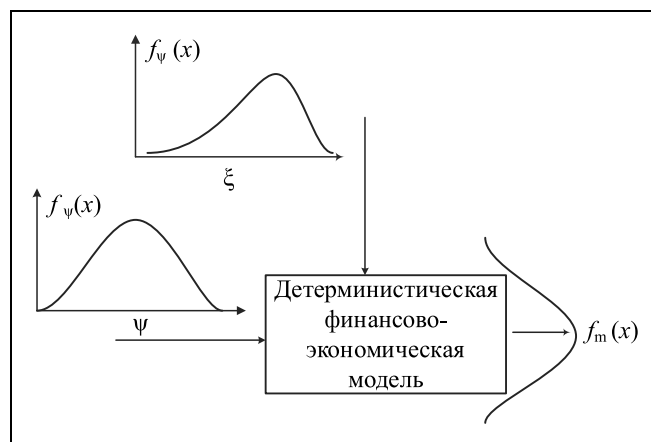


Рис. 2. Распространение неопределенности входных параметров: ξ, ψ — случайные величины, описывающие параметры модели; $f^*(x)$ — соответствующие им плотности распределения; m — результат модели (денежный поток и др.); $f_m(x)$ — плотность распределения вероятностей результатов расчета

ность в подходах авторов этих работ, большинство из них склоняется к тому, что один из лучших методов для такого анализа — метод Монте-Карло.

1. ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ И ОПИСАНИЕ ИСХОДНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

В рамках настоящей статьи будет применен метод денежных потоков как базовый для любой оценки с учетом вероятностной составляющей цены нефти и курса доллара. Более подробно модель описана в работах [14–16].

Рассмотрим дискретные моменты времени $t_i \in T$. Пусть цена нефти за баррель сорта Urals в момент t_i равна P_i^{oil} , а курс рубля к доллару $P_i^{rur-usd}$, тогда для рассматриваемой детерминистической системы, описывающей финансовое положение нефтяной компании, справедливо уравнение:

$$FCF_i = CF_{sales_i} - CF_{opex_i} - CF_{gaa_i} - CF_{ex.duty_i} - CF_{met_i} - CF_{tax_i} - CF_{capex_i} - CF_{debt_i}, \quad (1)$$

причем излишки/дефицит покрываются из средств на балансе:

$$Cash_i = FCF_i + \sum_{j=0}^{i-1} FCF_j$$

где CF_{sales_i} — денежный поток от продажи нефти в i -й период; $CF_{sales_i} = P_i^{oil} P_i^{rur-usd} V_{oil}$, V_{oil} — объем, реализуемой нефти; CF_{opex_i} — операционные затраты на производство нефти i -й период; CF_{gaa_i} —

административные затраты на производство нефти i -й период;

$CF_{ex.duty_i}$ — экспортная пошлина на нефть i -й период; (2)

CF_{met_i} — налог на добычу полезных ископаемых (далее — НДПИ) i -й период; (3)

CF_{tax_i} — прочие налоги (налог на прибыль и пр.) i -й период; CF_{capex_i} — инвестиционный денежный поток i -й период; CF_{debt_i} — денежный поток для обслуживания долга (проценты и основной долг); $Cash_i$ — наличные средства на счете организации в момент i .

Стоимость компании оценивается через сумму дисконтированных значений потока платежей, приведенных к текущему времени:

$$NPV = \sum_{i=0}^N \frac{FCF_i}{(1+r)^i}, \quad (4)$$

где FCF_i — денежный поток в момент i согласно уравнению (1), r — ставка дисконтирования, $r = 13\%$.

Долг в модели номинирован в трех разных валютах: российский рубль, доллар США и евро. Для простоты примем, что выплаты процентов и тела долга осуществляются ежемесячно, и к концу периода моделирования компания полностью расплачивается по своим долгам без продажи активов и привлечения внешнего финансирования. При этом текущие цены на нефть обеспечивают положительный свободный денежный поток, но не позволяют приобретать новые активы, все денежные потоки номинированы в российских рублях.

В уравнение (1) входят два случайных процесса с независимыми приращениями, стохастически стационарные, определенные на вероятностном пространстве (Ω, F, P) и зависящие от времени t , а именно, процессы, описывающие поведение цены на нефть $X = \xi(\omega, t)$ и курс рубля к доллару $Y = \psi(\omega, t)$. Подход к моделированию взаимосвязи между ними состоит в следующем: пусть существуют реализации случайной величины X , $X = (x_1, \dots, x_n)$ — апостериорное множество описаний объектов, а реализация случайной величины Y — множество допустимых ответов $Y = (y_1, \dots, y_n)$ из наблюдений $(s + m)$ -мерного случайного вектора (X, Y) , где X и Y принимают значения в $\mathbb{R}^s$ и $\mathbb{R}^m$ соответственно, $s, m \in \mathbb{N}$.

Предполагается, что существует неизвестная функциональная зависимость между X и Y , такая, что $\Phi: X \rightarrow Y$, значения которой известны

только на объектах обучающей априорной выборки $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, при этом $y_i = \Phi(x_i)$.

Получаемое приближение SA для функции $\Phi: X \rightarrow Y$ должно удовлетворять условию совпадения на узлах обучающей выборки:

$$SA(x_i) = y_i. \quad (5)$$

Приближение для неизвестной функции $\Phi: X \rightarrow Y$ в некоторой точке строится следующим образом.

Шаг 0. Если $x \in \{x_i\}_{i=1}^N$, то $SA(x_i = x) = y_i$ в соответствии с условием (5).

Шаг 1. Если $x \notin \{x_i\}_{i=1}^N$, то решение ищется в виде

$$y = SA(x, \{x_i, y_i\}_{i=1}^N) = \sum_{i=1}^N c_i(x, x_i) y_i, \quad (6)$$

где

$$c_i(x, x_i) = \frac{\|x - x_i\|_{l_1(\mathbb{R}^s)}^{-2}}{\sum_{i=1}^N \|x - x_i\|_{l_1(\mathbb{R}^s)}^{-2}},$$

$\|\cdot\|_{l_1}$ — стандартная l_1 -норма векторного пространства $\mathbb{R}^s$.

В работах [17, 18] вводится функция потерь $L(y, y^*)$, отвечающая за отклонение ответа $y = SA(x)$ от правильного ответа $y^* = \Phi(x)$.

Показано, что коэффициенты $c_i(x, x_i)$ в разложении (6) выводятся из условия минимизации функционала потерь в l_1 -норме:

$$L(x, y, \{x_i, y_i\}_{i=1}^N) = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \|y - y_i\|_{l_1(\Omega_y)}}{\sum_{i=1}^N \|x - x_i\|_{l_1(\Omega_x)}} \right)^2 \rightarrow \min.$$

Выбор l_1 -нормы в качестве меры расстояния диктуется наличием значительных отклонений в выборках («выбросов»), которые могут привести к некорректному учету неопределенностей для целей моделирования. Ярким примером такого отклонения может служить обвальное падение рубля по отношению к доллару США и евро 16 декабря 2014 г. при постоянной цене на нефть.

Определим области значений стохастических процессов:

$$\xi(t) \in [0; 200], \forall t, \xi_0 = 102,$$

$$\psi(t) \in [20; 100], \forall t, \psi_0 = 36,3.$$

Приращения случайного процесса распределены нормально как для нефти $\xi(\omega, t)$ и для курса рубля к доллару $\psi(\omega, t)$, аналогично работам [14–16]:

$$\xi(t_2) - \xi(t_1) = N(-1; 8), \quad (7)$$

$$\psi(t_2) - \psi(t_1) = N(0; 1), \quad (8)$$

где $N(\cdot, \cdot)$ — распределение Гаусса.

Графически пространство возможных реализаций случайного процесса $\xi(\omega, t)$ может выглядеть так, как показано на рис. 3. Для наглядности показаны еще и фактические значения стоимости нефти и выделены квантили уровня 0,1 и 0,9 для каждой функции распределения F_{ξ_i} всех моментов времени.

Отметим, что основной сценарий исследования таков: цена на нефть в среднем постепенно падает с текущих уровней, со скоростью 1 долл. за баррель в месяц с сохранением постоянной дисперсии значений, и на конец периода моделирования медианное значение равно 40 долл. за баррель.

Начиная с середины периода моделирования, некоторые реализации случайного процесса $\xi(\omega, t)$ становятся отрицательными, и в целях корректного учета введен барьер

$$\xi(t) = \begin{cases} \xi(t), & \xi(t) > 0, \\ 0, & \xi(t) \leq 0. \end{cases}$$

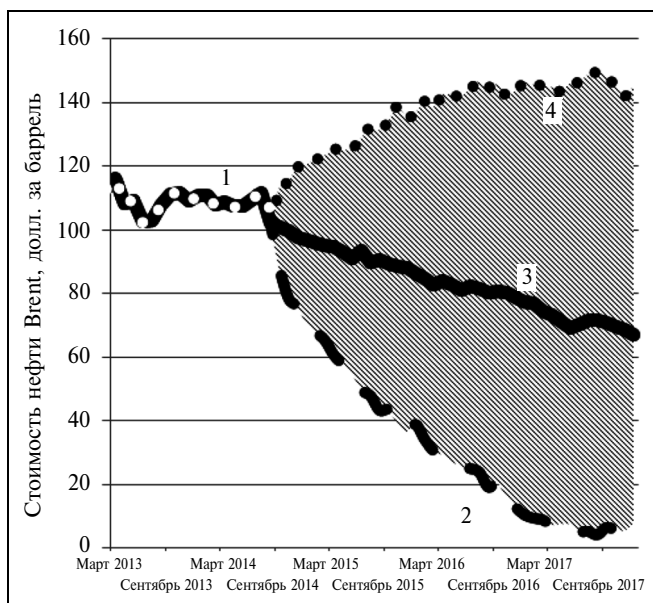


Рис. 3. Пространство возможных значений стоимости нефти. (Фактическое значение цены нефти Brent и прогноз на 2015–2017 гг.): 1 — фактическая цена нефти; 2 — нижняя вероятная цена нефти (квантиль 0,1); 3 — медианное значение цены нефти (квантиль 0,5); 4 — верхняя вероятная цена нефти (квантиль 0,9)

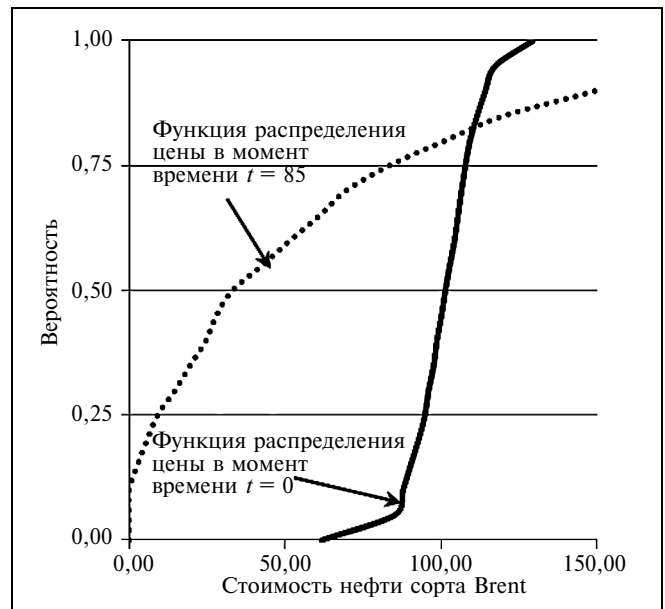


Рис. 4. Функции распределения вероятностей цен на нефть в начале и конце периода моделирования

Каждая реализация случайных процессов $\xi(t)$ и $\psi(t)$ представляет собой отдельно взятую траекторию цены нефти и курса рубля к доллару, как это видно из рис. 4.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть нефтяная компания, финансовая деятельность которой описывается уравнением (1), имеет возможность зафиксировать любую структуру долга в моменты $t = 0, 6, 12, 18, 24$. Необходимо получить решение (валютную структуру кредитов), которая гарантирует максимальную стоимость (4) с заданной вероятностью.

Пусть долг компании Y_{debt} состоит из рублей (RuR), долларов (USD) и евро (EUR). Для каждой части долга назначается своя процентная ставка: рубль — 13 %, доллар США — 8 % и евро 7 % годовых.

Поскольку компания действует в условиях российского налогообложения, денежные потоки выражены в рублях, и долг компании может быть записан в виде системы:

$$Y_{debt} = \alpha_1 RuR + \alpha_2 Y_{usd\ debt} Fx_{usd \rightarrow rur} + \alpha_3 Y_{eur\ debt} Fx_{eur \rightarrow rur} \quad (9)$$

где α_i — доли валютного долга, Fx_* — курс обмена на момент t .

В качестве целевой функции рассматривается стоимость компании (4)

$$\Phi(\xi_t, \psi_t) \stackrel{\text{def}}{=} NPV(\xi(\omega, t), \psi(\omega, t), x), \quad (10)$$

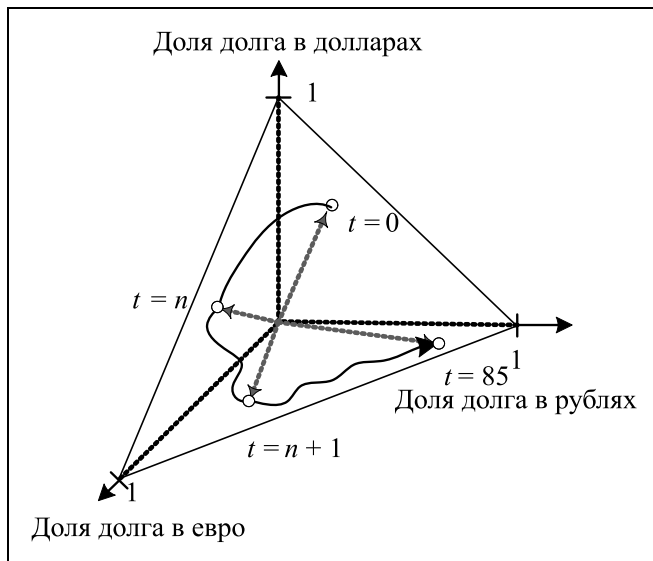


Рис. 5. Пространство всевозможных решений

где $\mathbf{x}$ — оптимизационная стратегия: вектор $\mathbf{x}(t) = (\alpha_1(t), \alpha_2(t), \alpha_3(t))$, подлежащий выбору и описывающий валютную структуру долга (9), а $\xi(t)$, $\psi(t)$ — стохастические процессы, определенные выше.

Дополнительные ограничения на оптимизационную стратегию записываются в виде функции:

$$Q \stackrel{\text{def}}{=} \|\mathbf{x}\|_1, \quad \alpha_k \in [0; 1]. \quad (11)$$

Рассмотрим вероятность события, такого, что целевая функция $\Phi(\xi_t, \psi_t)$ превышает заранее определенный порог φ и при этом выполнено дополнительное ограничение, т. е. $P_\varphi(\mathbf{x}(t), t) \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{P}\{\Phi(\xi_t, \psi_t) \geq \varphi, Q = 1\}$.

Для получения численных решений вводится критерий оптимизации с использованием функции квантили F_u , описывающей некоторый заранее определенный порог φ в момент t : $F_u(\mathbf{x}, t) \stackrel{\text{def}}{=} \max\{\varphi: P_\varphi(\mathbf{x}(t), t) \geq u\}$, где u — заранее выбранный уровень доверительной вероятности.

Окончательно задача стохастической оптимизации с критерием в форме квантили формулируется следующим образом: найти

$$\mathbf{x}_u(t) = \arg \max_{\mathbf{x} \in Q} F_u(\mathbf{x}(t), t), \quad (12)$$

где u — заранее выбранный уровень доверительной вероятности.

При условии существования решения $\mathbf{x}(t)$, оптимальное значение критерия $\varphi_u = F_u(\mathbf{x}(t))$.

Графически возможные наборы долгового портфеля в соответствии с ограничением (11) могут

быть отображены в виде основания тетраэдра с вершинами $(0, 1, 0)$, $(1, 0, 0)$, $(0, 0, 1)$. При этом в ходе решения задачи (12), полученное решение генерирует радиус-вектор с уравнением $\mathbf{r} = \alpha_1 \mathbf{i} + \alpha_2 \mathbf{j} + \alpha_3 \mathbf{k}$, который вырисовывает на поверхности тетраэдра годограф, как это видно из рис. 5. Понятно, что случай, когда одна или более координат принимает отрицательное значение, соответствует вкладу в связанной с ней валюте; однако, это соответствовало бы очевидной спекуляцией, и поэтому такая возможность исключена.

Вернемся, однако, к некоторым теоретическим вопросам рефинансирования. В ходе обсуждения результатов работ [14–16] было выяснено, что в реальности не существует «бесплатного» рефинансирования, так как многие банки вводят заградительные комиссии, чтобы не потерять доходы и не сталкиваться с риском реинвестирования. Поэтому были введены комиссии, которые уплачиваются при погашении (комиссия за досрочное погашение — 2 % от суммы погашения) и при привлечении новых средств (комиссия за фондирование — 1,5 % от суммы привлечения).

По мнению опрошенных аналитиков, такие заградительные комиссии могут существенно повлиять на стратегию рефинансирования.

Для решения вопросов управления долгом компании необходимо сформулировать критерии, по которым будет отбираться оптимальная структура долга. В зависимости от сформулированных критериев и будет решаться поставленная задача, которая может звучать так: какую структуру долгового портфеля нужно иметь, чтобы максимизировать стоимость компании? В работе [14] введены пять критериев, адаптация их для решения поставленной задачи приводит к следующим критериям.

- Максимизация медианы стоимости компании: бизнес «в среднем» оценивает стоимость компании, при этом не принимаются во внимание возможные «всплески» и «тяжелые хвосты» распределения:

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{x}}_{0,5}(t) &= \arg \max_{\mathbf{x} \in Q} F_{0,5}(\vec{\mathbf{x}}(t), \xi_t, \psi_t, t), \\ t &= 12, 24, 48. \end{aligned} \quad (13)$$

- Максимизация 0,1 квантили распределения стоимости. Иными словами, этот критерий описывает приверженца теории Талеба, который смотрит на всплески и на формы распределения, минимизируя вероятность появления «черного лебедя» в оценке стоимости компании:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{0,1}(t) &= \arg \max_{\mathbf{x} \in Q} F_{0,1}(\mathbf{x}(t), \xi_t, \psi_t, t), \\ t &= 12, 24, 48. \end{aligned} \quad (14)$$

3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ И ВЫВОДЫ

Приведем алгоритм поиска гарантирующего (по вероятности) решения.

Шаг 1. Фиксация координат вектора $x = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ при условии $\|x\|_1 = 1$.

Шаг 2. Генерация цены на нефть — траектория случайного процесса $\{\xi(t)\}$ методом Монте-Карло.

Шаг 3. Генерация курса рубля к доллару через непараметрическую аппроксимацию $\{\psi(t) = SA\{\xi(t)\}\}$.

Шаг 4. Вычисление траектории случайного процесса — целевой функции.

Шаг 5. Генерация 10 000 траекторий для каждого набора $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ с шагом 0,1 по каждому α_i при условии $\|x\|_1 = 1$.

Шаг 6. Выбор набора $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, максимизирующего u -квантиль распределения целевой функции (10).

Значения целевой функции (10) вычислялись с помощью метода Монте-Карло по 10 000 итераций для каждой тройки $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, при этом перебор троек $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ осуществлялся с шагом 0,1 для каждого α_i с учетом ограничения

Результаты оптимизации портфеля в зависимости от принятых критериев приведены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Какой основной вывод можно сделать на основе результатов моделирования? Без учета рисков (критерий (13)) стоимость максимизируется при полностью долларовом портфеле, поскольку с одной стороны, ставка по долларам много ниже ставки по рублям, с другой стороны, в те моменты, когда начинает «работать» естественное хеджирование, рефинсированию препятствуют заградительные комиссии, так как они разрушительно действуют на стоимость компании — сумма дисконтированных денежных потоков учитывает всю историю, и любые действия отражаются на стоимости компании.

Как и предполагалось ранее, комиссии кардинально влияют на стратегию рефинансирования,

Результаты моделирования

Критерий	Выбранная стратегия
Максимизация математического ожидания стоимости компании (13)	100 % долларовый портфель
Максимизация 0,1 квантили распределения стоимости (14)	Портфель, состоящий на 50 % из долларов и на 50 % из рублей, без рефинансирования

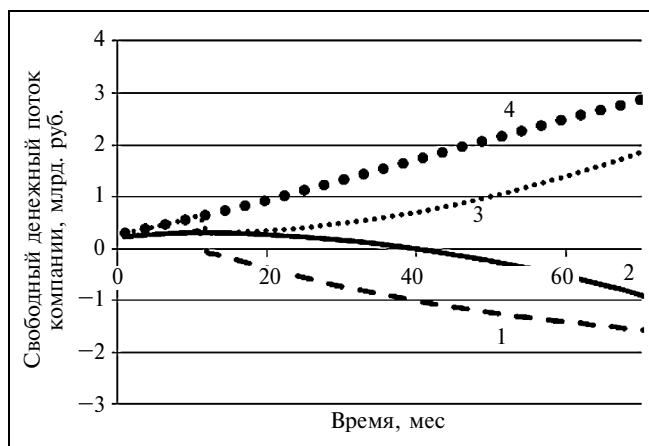


Рис. 6. Распределение денежных средств на балансе компании в зависимости от времени и портфеля денежные средства, квантиль: 1 — 0,1 в случае рефинансирования; 2 — 0,1 без рефинансирования; 3 — 0,9 в случае рефинансирования; 4 — 0,9 без рефинансирования

перекрывая положительный эффект от естественного хеджирования большими одновременными оттоками. Чем такие комиссии выше, тем позже эффект девальвации начинает работать «в плюс» рассматриваемой компании. Этот эффект прекрасно виден, если посмотреть на распределение денежных средств на балансе компании в каждый момент времени (рис. 6).

Рисунок показывает сравнение результатов двух моделей, одна из которых состоит полностью из долларового портфеля, другая — с рефинансированием 100 % долларового долга в рубли на 12-м месяце с начала моделирования.

Комиссии прекрасно справляются со своей основной задачей — удержания заемщика и активно препятствуют частым сменам кредитора, сводя на нет всю потенциальную выгоду от рефинансирования в другие валюты. На рисунке видно, как начинает «работать» естественное хеджирование, это видно из формы кривой, так как производная по времени в конце срока моделирования по квантили 0,9 в рефинансируемом портфеле явно выше, чем в портфеле без рефинансирования. Но при этом скорость роста денег на балансе не успевает за первоначальным разрывом, а эффект дисконтирования только снижает значимость потока в поздние моменты времени.

В нашем случае такой эффект компенсации рефинансирования наблюдается лишь при оптимизации портфеля по критерию квантили 0,1 распределения денежных средств в конце периода и то при условии, что все условия, кроме макроэкономических, остаются неизменными (рис. 7).

Таким образом, общий вывод таков: эффект от естественного хеджирования довольно слабый, ключевое значение для стоимости компании име-

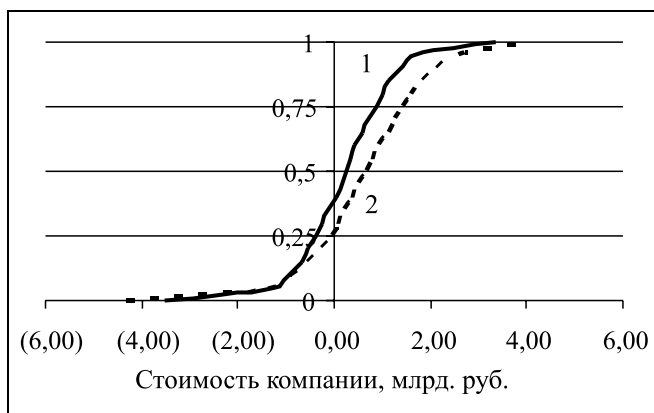


Рис. 7. Распределение стоимости компании для двух портфелей, долг 100 %: 1 — рубли; 2 — доллары

ет ставка, по которой обслуживается долг. Эффект от девальвации, связанной с ростом обменного курса из-за падения цен на нефть, играет несущественную роль при оценке стоимости.

Отметим, что авторы исследовали влияние вида и значений параметров (7) и (8) на итоговое решение задачи и пришли к выводу, что они влияют только на выбор момента рефинансирования, а не на выбранный портфель. Более того, экспериментально выявлено, что вид приращений не влияет на выбор портфеля из-за слагаемых (2) и (3), поскольку они составляют в разные моменты более 100 % от итоговой выручки (8) CF_{sales_i} благодаря особенностям структуры налогообложения нефтяной отрасли Российской Федерации, так называемому эффекту «ножниц Кудрина» [19], когда при падении цен на нефть нефтяные компании могут платить налогов больше, чем полученная выручка, так как система налогообложения нефтяной отрасли в России устроена таким образом, что ставки налогов для компаний устанавливаются, исходя из средней цены на нефть за предшествующий период [20].

Авторы благодарят д-ра техн. наук Ф.Т. Алескерову, д-ров физ.-мат. наук А.И. Кибзуна, Ю.С. Кана и А.В. Наумова за замечания и пожелания относительно выполненной работы, высказанные на научных семинарах ИПУ РАН и кафедры теории вероятностей МАИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чижиков С.В., Дубовицкая Е.А. Новый подход к оценке и управлению стоимостью нефтегазовых проектов // Нефтяное хозяйство. — 2012. — Т. 9. — С. 99.
2. Санников А.А. Методические аспекты формирования критерия оптимальной стратегии развития нефтегазодобыва-

ющих компаний // Нефтегазовое дело. — 2006. — № 8. — С. 45.

3. Гусейнов Б.М. Влияние уровня корпоративного управления на стоимость российских вертикально-интегрированных нефтегазовых компаний. — URL: http://ogbus.ru/authors/Guseinov/Guseinov_1.pdf (дата обращения 07.09.2015).
4. Соломонович К.А. Системный подход к созданию стоимости нефтегазовой компании // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. — 2011. — № 10.
5. Системный подход к созданию стоимости нефтегазовой компании / С.Н. Панкратов, А.С. Казак, И.В. Демкин, Ю.В. Литвин // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. — 2011. — № 10. — С. 5–15.
6. Markowitz Harry M. Portfolio Selection // Journal of Finance. — 1952. — Vol. 7, N 1. — P. 71–91.
7. Kataoka S. On a Stochastic Programming Model // Econometrica. — 1963. — N 31. — P. 181–196.
8. Dupačová J. Portfolio Optimization via Stochastic Programming: Method of Output Analysis // Math. Meth. Oper. Res. — 1999. — Vol. 50. — P. 245–270.
9. Кибзун А.И., Кан Ю.С. Задачи стохастического программирования с вероятностными критериями. — М.: Физматлит, 2009.
10. Кан Ю.С., Тузов Н.В. Минимизация квантили нормального распределения билинейной функции потерь // Автоматика и телемеханика. — 1998. — № 11.
11. Кибзун А.И., Наумов А.В. Двухэтапные задачи квантильного линейного программирования // Автоматика и телемеханика. — 1995. — № 1. — P. 83–93.
12. Григорьев П.В., Кан Ю.С. Оптимальное управление по квантильному критерию портфелем ценных бумаг // Автоматика и телемеханика. — 2004. — Вып. 2. — P. 179–197.
13. Dmitriev A., Islamov R., Korotin V., Petrov D. Probabilistic Risk Assessment — Uncertainty Analysis / Report for US NRC. IBRAE RAS, 2003.
14. Коротин В.Ю., Исламов Р.Т. Риск-ориентированное планирование структуры долга нефтяной компании // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. — 2014. — № 12. — С. 59–65.
15. Коротин В.Ю., Ульченков А.М., Исламов Р.Т. Оптимизация структуры долгового портфеля нефтяной компании по квантильному критерию // Корпоративные финансы. — 2014. — № 3 (31). — С. 68–82.
16. Коротин В.Ю., Ульченков А.М., Исламов Р.Т. Оценка вероятности дефолта нефтяной компании // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. — 2014. — № 11. — С. 10–18.
17. Islamov R. Uncertainty Analysis. Report for US Nuclear Regulatory Commission. — 1998.
18. Волков А.А. Разработка математических моделей и методик стохастического моделирования для вероятностного анализа безопасности и надежности объектов энергетики: дис. канд. физ.-мат. наук. — М., 2004.
19. Мещерин А. Налогообложение: ножницы Кудрина и пряники для избранных // Нефтегазовая вертикаль. — 2010.
20. Подобедова Л., Дзядко Т. «Ножницы Кудрина» подрежут доходы нефтяников на \$6 млрд. — URL: <http://top.rbc.ru/business/17/12/2014/54904a482ae596024bfcd952> (дата обращения 17.06.2015).

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Т. Алескерovým.

Коротин Владимир Юрьевич — директор департамента, ОАО НК «РоссНефть», г. Москва, ✉ korotinvy@russneft.ru,

Ульченков Арсений Михайлович — директор департамента, Группа «Сумма», г. Москва, ✉ Ulchenkov@hotmail.com,

Исламов Рустам Талгатович — д-р физ.-мат. наук, директор, АНО «Международный центр по ядерной безопасности Минатома России», ✉ rustam.t.islamov@gmail.com.



МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИЙ РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

А.Н. Соломатин, В.Р. Хачатуров

Рассмотрена специфика стратегического контроля как завершающего этапа процесса стратегического управления регионом. Предложена общая модель динамической нестационарной системы и как ее частные случаи — модели систем для различных способов управления. Предложены методики мониторинга отклонений, мониторинга возмущений внешней среды и мониторинга кризисных ситуаций, а также интегрированный алгоритм мониторинга реализации стратегий, объединяющий эти методики для целей практического применения. Рассмотрено применение динамического проектирования при корректировке и адаптации стратегий регионального развития.

Ключевые слова: стратегическое управление регионом, стратегический контроль, мониторинг реализации стратегий, корректировка стратегий.

ВВЕДЕНИЕ

В течение многих лет в Вычислительном центре им. А.А. Дородницына РАН ведется работа по созданию автоматизированных систем регионального планирования и проектирования, обеспечивающих решение задач комплексного освоения территорий. Сформировалось научное направление — «региональное программирование» [1], созданы математические модели, методы и алгоритмы для решения задач долгосрочного планирования освоения добывающих регионов [2].

В целях дальнейшего развития проблематики долгосрочного планирования в современных условиях в работе [3] предложены формализованные модели для некоторых этапов процесса стратегического управления [4, 5]. В дальнейшем они были адаптированы в работах [6, 7] для решения задач стратегического управления региональными системами [8, 9], которые составляют важнейший класс крупномасштабных систем [10].

Принципиальный этап стратегического управления регионом — стратегический контроль реализации стратегий, который наиболее полно отражает сущность процесса управления и обеспечивает замыкание контура обратной связи этого процесса; содержание стратегического контроля составляют мониторинг реализации, корректировка и адаптация стратегий регионального развития [11].

Методы контроля необходимы для самых различных типов управления, включая оперативное, индикативное, стратегическое и программно-целевое [12] управление; последние два типа управления широко применяются для решения региональных задач. Основные отличия стратегического и программно-целевого управления в контексте применения в них методов контроля состоят в следующем.

Стратегическое управление регионом является результатом адаптации западного корпоративного менеджмента для решения региональных задач. Основной акцент делается на анализе внутренней и внешней среды, учете конкуренции и нестабильности среды, формализации стратегий и др.

Программно-целевое управление родилось в условиях плановой экономики и в основном ориентировано на решение задач государственного управления, включая решение региональных задач. Основной акцент делается на конкретизации целей и задач, учете ресурсных ограничений, формировании программ, проектов и системы управления их реализацией.

Можно предположить, что для решения задач регионального развития целесообразен синтез этих двух методов управления, объединяющий их сильные стороны и использующий инвариантные к типам управления методы контроля.

Настоящая статья посвящена рассмотрению специфики и основных составляющих стратеги-

ческого контроля как завершающего этапа процесса стратегического управления регионом.

1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Для стратегического контроля можно определить категориальные элементы, образующие в совокупности систему контроля [13]: субъект, объект, предмет, цель, задачи и критерии, принципы и требования, виды контроля, методы, технику и технологию, процесс и этапы, результаты контроля и др.

Цель стратегического контроля состоит в том, чтобы полученные при реализации стратегии результаты были близки к требуемым стратегическим целям. Критерии успешности контроля определяются, исходя из достижения целей, а их на обобщенном уровне у системы две: результативность (степень достижения целей) и эффективность.

Основные задачи стратегического контроля для региональной социально-экономической системы (РСЭС): оценка состояния и динамики развития региона; определение причин, источников и характера угроз; прогнозирование последствий реализации угроз; разработка корректирующих воздействий.

Основные принципы контроля — непрерывность, своевременность, разновременность управляющих воздействий, учет инерционности, учет ретроперспективы, ориентация на результат, простота и экономичность.

Стратегический контроль состоит из следующих этапов: установление целей, выработка критериев оценки и оценочных показателей, определение размера отклонений, сбор и обработка данных, сравнение оценочных показателей с целевыми, выявление значимых отклонений, анализ причин отклонений, принятие корректирующих воздействий или пересмотр критериев.

Рассмотрим взаимодействие этих категориальных элементов. Субъект контроля проводит контроль объекта контроля; субъект преследует определенные цели, формализованные в виде критериев оценки процесса контроля, для чего решает основные задачи контроля. При этом он руководствуется основными принципами контроля, учитывает факторы влияния среды, ограничения, требования и имеющиеся в его распоряжении ресурсы. Далее, субъект выбирает необходимые способы и методы контроля, которые адекватны ситуации, объединяет их в определенную технологию и реализует с их помощью этапы процесса контроля. Субъект стремится избежать возможных проблем, возникающих в процессе контроля, и получает результаты контроля.

2. МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ

Процесс функционирования и развития РСЭС следует рассматривать как процесс функционирования и развития сложной самоорганизующейся системы в нестабильной среде. Основные свойства таких систем — открытость, нелинейность, нестационарность, неравновесность, адаптивность, целенаправленность, слабая структурированность и др. Поэтому для изучения процесса стратегического управления целесообразно привлечение терминологии аппарата теории систем, теории управления и системного анализа [14–16].

Функционирование РСЭС может быть описано с помощью обобщенной модели динамической нестационарной системы [11, 17]:

$$y^{\tau}(t) = F^{\tau}(x^{\tau}(t)).$$

Здесь $z^{\tau}(t) \equiv (x^{\tau}(t), y^{\tau}(t))$, $z^{\tau}(t) \in Z^{\tau}$, $x^{\tau}(t) \equiv (u^{\tau}(t), v^{\tau}(t))$, где $z^{\tau}(t)$ — переменные (параметры) системы, Z^{τ} — область изменения параметров при $t \geq t_0$, $y^{\tau}(t)$ — фазовые переменные (траектория) системы, $u^{\tau}(t)$ — параметры управления, $v^{\tau}(t)$ — неуправляемые параметры (возмущения среды). Индекс τ означает, что по сравнению с начальным моментом времени t_0 при $\tau \geq t_0$ область изменения параметров Z , целевая область G и сама система F могут изменяться. Цель развития системы — попадание системы в заданное целевое множество $F^{\tau} \subset Y^{\tau}$ в последний момент времени интервала $[\tau, T(\tau)]$, т. е. $y^{\tau}(T(\tau)) \in G^{\tau}$.

Стратегия (план, проект) развития системы определяется как $\pi^{\tau}(t) \equiv (u^{\tau}(t), y^{\tau}(t)) \equiv (u^{\tau}, y^{\tau}) \equiv \pi^{\tau}$, а реальный проект $\bar{\pi}^{\tau}$ [1] как проект, наилучший в некотором смысле по многим критериям оценки. Для реального проекта траектория движения системы $\bar{y}^{\tau}(t)$ на интервале времени $[\tau, \bar{T}(\tau)]$ должна:

- быть допустимой, т. е. $\bar{y}^{\tau}(t) = F^{\tau}(\bar{x}^{\tau}(t))$, $(\bar{x}^{\tau}(t), \bar{y}^{\tau}(t)) \in Z^{\tau}$, $t \in [\tau, \bar{T}(\tau)]$;
- попадать в целевую область, т. е. $\bar{y}^{\tau}(\bar{T}(\tau)) \in G^{\tau}$;
- быть наилучшей в некотором смысле, то есть соответствовать реальному проекту $\bar{\pi}^{\tau}$.

Определим модели динамических систем для различных способов управления [14, 16] как частные случаи приведенной обобщенной модели динамической нестационарной системы. Способы различаются степенью адаптивности и возможностями корректировки траекторий развития сис-



темы на основании результатов мониторинга реализации.

Введем дополнительно обозначения: d — время задержки (память системы), отражающее инерционность системы; $y^{\tau}(t)$ — фактическая траектория движения системы в пространстве состояний; $\bar{y}^{\tau}(t)$ — плановая траектория в соответствии с разработанной стратегией.

Программное управление (жесткое, без обратных связей):

$$y(t) = F(u(t)).$$

Предусматривает выполнение заранее заданной программы, которая реализуется без учета фактического состояния объекта управления и воздействий среды. Применяется при несущественном влиянии среды. Пример — баллистическая ракета.

Управление по возмущениям (компенсационное, разомкнутое):

$$y(t) = F(u(t, v(t)), v(t)).$$

Управляющая система измеряет возмущения среды и формирует с их учетом компенсирующие управляющие воздействия, которые корректируют закон управления. Здесь значение управления зависит не от поведения объекта, а только от возмущений. Применяется, если диапазон изменений среды ограничен. Пример — кондиционер.

Управление по отклонению (с обратной связью, замкнутое):

$$y(t) = F(u(t, y(t-d), \bar{y}(t-d)), v(t)).$$

Находится закон изменения системы (например, при помощи моделирования), определяется расхождение с ним реальной траектории движения системы и строится управление, которое должно минимизировать рассогласование и обеспечить возврат на запланированную траекторию. Примеры — паровой котел, автопилот.

Адаптивное управление:

$$y(t) = F(u(t, v(t), y(t-d), \bar{y}(t-d)), v(t)).$$

В системе имеется два контура управления — по отклонению и по возмущениям, что обеспечивает устойчивое функционирование при произвольных возмущениях внешней и внутренней среды. Пример — безработица при капитализме (обратная связь) смягчается социальными программами (компенсация возмущений).

Терминальное управление:

$$y(t) = F(u^{\tau}(t, v(t), y(t-d), \bar{y}(t-d)), v(t)).$$

Оно предполагает совмещение процессов управления и синтеза управления, то есть при необходимости может изменяться закон управления;

по мере приближения к цели качество управления возрастает. Пример — игра в гольф.

Управление по параметрам:

$$y^{\tau}(t) = F(u^{\tau}(t, v(t), y^{\tau}(t-d), \bar{y}^{\tau}(t-d)), v(t)).$$

Применяется, когда невозможно задать программную траекторию на весь период управления либо когда при больших отклонениях от этой траектории ее невозможно исправить. В этом случае производится подстройка параметров системы, пока траектория не попадет в целевую область. Примеры — адаптация животных к среде, вождение автомобиля.

Адаптация по целям:

$$y^{\tau}(t) = F(u^{\tau}(t, v(t), y^{\tau}(t-d), \bar{y}^{\tau}(t-d)), v(t)), y^{\tau}(T(\tau)) \in G^{\tau}.$$

Если управление по параметрам не привело к успеху, то следует изменить цель на новую, достаточно близкую к первоначальной, но более адекватную для системы при заданных ресурсах. Пример — действия игрока при игре в футбол.

Структурная адаптация:

$$y^{\tau}(t) = F^{\tau}(u^{\tau}(t, v(t), y^{\tau}(t-d), \bar{y}^{\tau}(t-d)), v(t)).$$

Если не нашлось такой комбинации значений управляемых параметров и таких целей, чтобы траектория системы пересекла целевую область, то это может быть достижимо для другой системы, базирующейся на исходной. Поэтому морфология системы (состав элементов, структура) изменяются таким образом, чтобы обеспечить попадание в целевую область. Пример — реконструкция предприятия при переходе на выпуск новой продукции.

Перечисленные способы управления упорядочены по усилению влияния на управляемую систему: ничего не менять, изменить управление, изменить параметры, изменить траекторию движения, изменить цели, изменить морфологию системы; применение каждого способа обычно предполагает применение предыдущих способов.

3. МОНИТОРИНГ ОТКЛОНЕНИЙ

В процессе контроля реализации региональных стратегий предлагается одновременно осуществлять сразу несколько видов мониторинга: мониторинг отклонений, мониторинг сигналов среды и мониторинг кризисных явлений. Очевидна взаимная связь этих видов мониторинга: так, рост возмущений среды может привести к кризисным явлениям и поэтому к проблемам с реализацией стратегии.

Мониторинг отклонений составляет основу мониторинга реализации стратегий и обеспечивает оценку отклонений реальной динамики показателей системы от прогнозных значений.

В стратегическом управлении широкое распространение получила концепция сбалансированной системы показателей (Balanced Scorecard) [4], в соответствии с которой цели системы подразделяются на направления, и для каждой цели определяются основные непротиворечивые показатели ее достижения — ключевые показатели эффективности. Выделение ключевых показателей согласуется с результатами синергетики, когда в процессе самоорганизации сложных систем выделяется небольшое число так называемых параметров порядка, к которым подстраиваются остальные [18].

При мониторинге отклонений сравнивается фактическая динамика каждого показателя с прогнозными значениями, полученными при моделировании и характеризующими стратегию развития РСЭС. Для каждого ключевого показателя задается максимальное допустимое отклонение от плановой величины в абсолютных или относительных единицах. Кроме того, сравнение может проводиться с эталонными данными, такими как критические (пороговые) данные, данные за прошедшие периоды времени, данные регионов-лидеров и регионов-конкурентов.

Пусть на интервале времени $[1, T]$ обеспечивается выполнение n стратегических целей, причем выполнение каждой i -й цели со значимостью g_i , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, характеризуется показателями из множества $J_i \subseteq J$, где $J = \{1, 2, \dots, m\}$ — множество номеров контролируемых ключевых показателей эффективности.

Пусть далее для всех $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ и $j \in J$ известны функции $P_j(t)$ и $F_j(t)$ — прогнозная и фактическая динамика показателя с номером j , w_j — нормированные веса, характеризующие значимость показателей, и некоторые пороговые значения d_j и r_j .

Для каждой i -й цели определяется множество показателей $J_i = J_i^1 \cup J_i^2 \cup J_i^3$, где $J_i^2 \cap J_i^3 = \emptyset$, $|J_i^1 \cap J_i^2| \geq 0$, $|J_i^1 \cap J_i^3| \geq 0$ и для каждого показателя из J_i^k , $k = 1, 2, 3$, контролируется, чтобы его значения не выходили за пределы допустимого отклонения от плана d_j и за пределы диапазона критических фактических значений $[r_j^1, r_j^2]$.

Далее на основании результатов мониторинга рассчитываются показатели:

$D_j^1(t) = |F_j(t) - P_j(t)/d_j|$, $j \in J_i^1$ — относительное отклонение фактического значения j -го показателя от планового значения;

$D_j^2(t) = \max((F_j(t) - r_j)/r_j^2, 0)$, $j \in J_i^2$ — то же, выше критического значения;

$D_j^3(t) = \max((r_j - F_j(t))/r_j^1, 0)$, $j \in J_i^3$ — то же, ниже критического значения.

Тогда интегральная степень отклонения от стратегических целей системы рассчитывается в динамике как

$$D(t) = \sum_{i=1}^n g_i \left(a_1 \sum_{j \in J_i^1} w_j D_j^1(t) + a_2 \sum_{j \in J_i^2} w_j D_j^2(t) + a_3 \sum_{j \in J_i^3} w_j D_j^3(t) \right),$$

где a_1, a_2, a_3 — нормированные веса.

В процессе мониторинга отклонений для каждой i -й цели может быть построено множество «проблемных» показателей, для которых выявлено устойчивое отклонение от плановых значений либо устойчивое несоответствие критическим значениям:

- $\tilde{J}_i^1 \subseteq J_i^1$, где для любого показателя с номером $j \in \tilde{J}_i^1$ устойчиво $|F_j(t) - P_j(t)| > d_j$;
- $\tilde{J}_i^2 \subseteq J_i^2$, где аналогично $P_j(t) > r_j^2$;
- $\tilde{J}_i^3 \subseteq J_i^3$, где аналогично $P_j(t) < r_j^1$.

Из-за нелинейности РСЭС не всегда можно решить обратную задачу, т. е. определить причину полученных отклонений в реализации стратегии и необходимые для нейтрализации этих отклонений действия. Поэтому целесообразно применение факторного анализа: разложив по факторам влияния «проблемные» выходные показатели РСЭС

$\tilde{J} = \bigcup_{i=1}^n \tilde{J}_i$, $|\tilde{J}| = l$, можно выбрать для последующего изменения те показатели, которые имеют наибольшие веса в разложениях вида $y_k = \sum_{j=1}^m \alpha_{kj} x_j$,

$y_k \in \tilde{J}$, $k = \overline{1, l}$.

4. МОНИТОРИНГ ВОЗМУЩЕНИЙ СРЕДЫ

В литературе по стратегическому управлению стало общим местом положение о нестабильности современной бизнес-среды [4, 5]; имеется в виду рост новизны, частоты, быстроты, непредсказуемости, хаотичности и разнообразия изменений с одновременным ростом сложности возникающих проблем. Все это ухудшает возможности управления, поскольку по принципу необходимого разнообразия Эшби для успешного управления раз-



нообразии субъекта управления должно быть не меньше разнообразия объекта управления [15].

Степень нестабильности обычно оценивается на основе шкалы И. Ансоффа — интервальной шкалы с балльными оценками [5], где нестабильность среды определяется как среднее арифметическое трех характеристик нестабильности — привычности, темпа и предсказуемости изменений. При нестабильности выше 3,5 балла имеет место сложная и труднопредсказуемая обстановка, в которой наиболее целесообразно управление на основе гибких экспертных решений (управление по «слабым сигналам», ранжирование стратегических задач, управление в условиях стратегических неожиданностей) [5]. Нетрудно видеть, что в методике Ансоффа рассматриваются не все характеристики нестабильности внешней среды, причем отсутствует должная степень формализации.

Введем следующие характеристики нестабильности:

а) относящиеся к сущности событий внешней среды: сила, интенсивность события (x_1) и скорость протекания события, темп изменений (x_2);

б) временные характеристики события: вероятность (частота) возникновения события (x_3) и непредсказуемость события (x_4);

в) относящиеся к влиянию события на систему: глубина влияния события на систему (x_5) и срочность решения задач, возникающих при воздействии события (x_6).

При расчете уровня нестабильности внешней среды предполагается, что:

— элементный состав множества $E(t)$ рассматриваемых случайных событий среды изменяется во времени;

— характеристики внутри каждой из групп а, б и в взаимно усиливают влияние друг друга, поэтому при расчетах используется сумма произведений значений характеристик.

Тогда уровень нестабильности может быть рассчитан по формуле:

$$N(t) = \sum_{x \in E(t)} (c_1 x_1 x_2 + c_2 x_3 x_4 + c_3 x_5 x_6),$$

где c_i , $i \in \{1, 2, 3\}$ — нормированные веса, а $x = (x_1, \dots, x_6)$ — вектор характеристик нестабильности из групп а, б и в.

5. МОНИТОРИНГ КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Наряду с мониторингом отклонений и возмущений внешней среды при стратегическом контроле реализации стратегий регионального развития необходим мониторинг кризисных явлений.

Кризис определяется как маловероятное событие, способное угрожать жизнедеятельности системы, характеризующееся неопределенными причинами и труднопредсказуемыми последствиями, требующее принятия немедленных решений [4].

Переход от рядовых отклонений и возмущений среды к кризисным явлениям в развитии системы происходит непрерывно и незаметно: все зависит от размера отклонений и возмущений, а также от темпов их роста. Такая динамика развития кризисов согласуется и с положениями диалектики (переход количества отклонений и возмущений в новое качество — кризис), и с результатами синергетики, относящимися к режимам с обострением [18], когда параметры системы неожиданно начинают неограниченно возрастать за ограниченное время. Механизм кризиса «запускается» субъектами внешней и внутренней среды системы, которые инициируют процесс следования одного за другим цепочки взаимозависимых негативных явлений (контур положительной обратной связи).

Кризисные явления предлагается диагностировать по следующим характеристикам изменений (отклонений и возмущений среды): интенсивность изменений (темпы прироста), неустойчивость изменений (изменчивость уровня колебаний) и неравномерность изменений для различных показателей.

- Предлагается измерять, как это делается в эффективных технических регуляторах (например, в ракете, автопилоте), не только значение отклонения некоторого показателя $D(t)$, но и его динамические характеристики — первую производную (скорость роста отклонения) $D'(t)$ и вторую производную (ускорение) $D''(t)$, которые служат точными и ранними признаками возникающих проблем [14]. Это позволяет даже при малом отклонении вырабатывать управления с упреждением и с учетом характера отклонения, не допуская его роста даже при сильных воздействиях. В зависимости от соотношений знаков производных возможны различные перспективы развития кризиса: от самых неблагоприятных при $D'(t) > 0$, $D''(t) > 0$ до самых благоприятных при $D'(t) < 0$, $D''(t) < 0$.

Аналогично, на основе динамики уровня нестабильности среды $N(t)$ можно определить показатели интенсивности роста нестабильности среды — производные $N'(t)$ и $N''(t)$.

- В теории катастроф [18] известны так называемые флаги катастроф, важнейшие из которых — нарастание амплитуды и частоты колебаний характеристик системы, свидетельствующие о неустойчивости происходящих в ней процессов. Поэтому в качестве показателей неустойчивости предлагается рассматривать дисперсию ди-

намики отклонений $\hat{D}(t)$ и дисперсию динамики возмущений среды $\hat{N}(t)$.

- О нарастании кризисных явлений будет свидетельствовать также усиление неравномерности поведения различных показателей. Так, в модели динамик показателей [5] необходимо, чтобы для различных сфер деятельности компании выдерживались заданные соотношения между темпами роста основных показателей. Например, для сферы материального производства должно выполняться соотношение $ВВП > \Phi\P > \Phi H$, где $ВВП$, $\Phi\P$ и ΦH — соответственно, темпы роста $ВВП$, фонда потребления и фонда накопления.

Пусть s — число основных сфер деятельности РСЭС, $R_k(t)$, $k \in \{1, 2, \dots, s\}$ — доля невыполняемых контролируемых соотношений (заданных в виде уравнений и неравенств) между темпами роста показателей для k -й сферы, а b_k — нормированные веса, характеризующие значимость каждой k -й сферы. Тогда показатель неравномерности изменений есть

$$C_1(t) = \sum_{k=1}^s b_k R_k(t).$$

- Наконец, кризис можно рассматривать как внутрисистемное явление, которое характеризуется недостаточной эффективностью $\mathcal{E}$ функционирования системы [5], когда имеет место завышение компанией оценки своей хозяйственной деятельности по отношению к оценке этой деятельности рынком и результаты функционирования (доходы) B не покрывают расходы на обеспечение функционирования P :

$$\mathcal{E} = B/P.$$

Для РСЭС можно ввести производный динамический показатель неэффективности функционирования:

$$C_2(t) = 1/\mathcal{E}(t).$$

Тогда итоговая формула для динамической оценки близости кризисных явлений в развитии РСЭС может быть построена как взвешенная сумма показателей интенсивности (первые четыре слагаемых формулы), неустойчивости (следующие два слагаемых) и неравномерности (последние два слагаемых) изменений:

$$C(t) = c_1 D'(t) + c_2 D''(t) + c_3 N'(t) + c_4 N''(t) + c_5 \hat{D}(t) + c_6 \hat{N}(t) + c_7 C_1(t) + c_8 C_2(t),$$

где c_i , $i \in \{1, 2, \dots, 8\}$, — нормированные веса, отражающие значимость каждой методики для конкретной РСЭС.

6. ИНТЕГРИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ МОНИТОРИНГА

Особенности стратегического контроля определяются следующими особенностями РСЭС как сложных нестационарных систем в условиях неустойчивой среды:

- ограниченность формализованного описания и анализа РСЭС;
- ограниченность моделирования и прогнозирования поведения РСЭС на большом интервале времени;
- ограниченность возможности формирования постоянной долгосрочной стратегии, определяющей оптимальную траекторию развития РСЭС;
- влияние среды на систему может варьироваться от слабого до катастрофического, поэтому спектр управлений может меняться от корректировки траектории развития и до изменения морфологии системы;
- процессы управления и синтеза управления могут чередоваться;
- процессы функционирования и развития РСЭС происходят одновременно и налагаются друг на друга.

Относящиеся к стратегическому контролю вопросы исследуются во многих дисциплинах, включая стратегическое управление, теорию управления, теорию систем, синергетику, теорию катастроф, антикризисное управление и др. Очевидно, что региональные власти в процессе управленческой деятельности не могут и не должны по очереди применять каждый из этих формальных аппаратов (вначале анализировать слабые сигналы среды, затем предвестники катастроф, вначале использовать подходы теории управления, потом теории систем и т. д.). Получая на вход единый поток данных о состоянии контролируемой РСЭС, они нуждаются в таком же едином инструменте для анализа этого потока.

Поэтому возникает необходимость в разработке интегрированного подхода к стратегическому контролю, в основе которого должна лежать интеграция в едином процессе мониторинга отклонений, мониторинга внешней среды и мониторинга кризисных явлений.

Предлагается интегрированный алгоритм мониторинга реализации стратегий регионального развития. Суть алгоритма составляют последовательная проверка превышения допустимых уровней значений и проверка наличия ускоряющего роста динамических показателей $C(t)$, $N(t)$ и $D(t)$, формулы для расчета которых приведены выше.

Шаг 1. Определить цели развития РСЭС и относительную важность каждой из целей.



Шаг 2. Разработать систему контролируемых ключевых показателей эффективности и определить важность каждого из показателей в смысле достижения целей РСЭС.

Шаг 3. Для каждого из показателей определить допустимый размер отклонения фактического значения от установленного планового и критические (пороговые) значения.

Шаг 4. Начать реализацию стратегии, положив номер текущего года периода реализации $t = 1$.

Шаг 5. Для каждого ключевого показателя определить фактически достигнутое значение показателя в текущем году с номером t .

Шаг 6. Рассчитать оценку близости кризисных явлений в текущем году $C(t)$.

Шаг 7. Если $C(t) > C_{\max}$ (превышение допустимого уровня) либо $C''(t) > 0$, то перейти к антикризисному управлению.

Шаг 8. Рассчитать уровень неустойчивости внешней среды в текущем году $N(t)$.

Шаг 9. Если $N(t) > N_{\max}$ (превышение допустимого уровня) либо $N''(t) > 0$, то перейти к управлению на основе гибких решений.

Шаг 10. Рассчитать степень отклонения от реализации стратегических целей в текущем году $D(t)$.

Шаг 11. Если $D(t) > D_{\max}$ (превышение допустимого уровня) либо $D''(t) > 0$, то обеспечить устранение отклонений.

Шаг 12. Иначе продолжить мониторинг и перейти к шагу 5 для $t = t + 1$.

Мониторинг должен производиться в реальном режиме времени с интервалом запаздывания, не превышающим промежутка времени, в течение которого необходимо принять решение.

Данный алгоритм может быть существенно усложнен. Для определения типа ситуации может быть использовано гораздо большее количество различных данных, а для выбора одного из четырех перечисленных типов решений — аппарат ситуационного управления.

7. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОРРЕКТИРОВКА СТРАТЕГИЙ

Управление в сложных системах принципиально отличается от обычного: такие системы слабо предсказуемы, в них сложно определить желаемое целевое состояние, наиболее приемлемый путь в это состояние (стратегию движения системы), а также «навязать» этот путь системе при помощи управляющих воздействий [15, 16]. При длительности периода стратегического планирования 15–20 лет в условиях нестабильной среды нереально построить наилучшую по заданным критериям стратегию и следовать ей длительное время. Кроме того, каждая РСЭС представляет собой

развивающуюся систему, в которой одновременно происходят два противоречивых процесса — функционирование и развитие. В связи со всеми этими причинами ранее определенные стратегии могут изменяться во времени.

Пусть область определения параметров системы Z , оператор системы F и целевая область развития системы G , определенные в момент времени τ , могут изменяться при $t \geq \tau$. В этом случае наилучший проект (стратегия, план) $\bar{\pi}^\tau$ также будет изменяться во времени, что приводит к необходимости динамического проектирования с возможностью изменения стратегии в любой момент времени $t \geq \tau$ [1, 17]. Динамическое проектирование состоит из трех этапов.

Этап 1. Определение реального проекта $\bar{\pi}^\tau$, $\tau \geq t_0$.

Этап 2. Слежение за проектом в моменты времени t , $t_0 < \tau \leq \bar{T}(\tau)$. В режиме слежения оцениваются отклонения фактического состояния системы $(x^\tau(t), y^\tau(t))$ от проектного $(\bar{x}^\tau(t), \bar{y}^\tau(t))$, проверяется, остается ли проект допустимым и реальным при сохранении управления $\bar{u}^\tau(t)$ на интервале $[\tau, \bar{T}(\tau)]$, а также проверяется попадание в целевую область G^τ .

Этап 3. Корректировка проекта в момент времени t , $t_0 < \tau \leq \bar{T}(\tau)$. Если в результате слежения выясняется, что при сохранении управления $\bar{u}^\tau(t)$ проект перестал быть реальным, то в этот момент времени τ' он корректируется, для чего определяется новый проект $(\bar{u}^{\tau'}(t), \bar{y}^{\tau'}(t))$ и даются рекомендации о способе изменения управления $\bar{u}^\tau(t)$. Для корректировки применяются те же методы, что и для формирования проекта, однако при этом могут решаться и новые задачи.

Если по результатам стратегического контроля корректируются цели и стратегии развития РСЭС, то она переходит в класс адаптивных систем, использующих корректирующую обратную связь. Корректирующая обратная связь, в зависимости от результатов мониторинга, может использоваться для решения следующих задач.

- В более благоприятных случаях вырабатывается корректирующее управляющее воздействие, чтобы вернуть РСЭС на курс реализуемой стратегии. Эффективная система управления должна работать при малых отклонениях параметров, не допуская их опасного нарастания до предельно допустимых значений.
- В менее благоприятных случаях, при существенных изменениях как самой РСЭС, так и ее внешней среды, могут потребоваться и более существенные изменения, реализующие раз-

личные рассмотренные выше способы управления; каждый способ применяется в том случае, если применение предыдущих не привело к успеху:

- терминальное управление (изменение закона управления системы);
- управление по параметрам (изменение параметров и стратегии развития системы);
- адаптация по целям (изменение целей развития системы);
- структурная адаптация (изменение состава и структуры системы).

В процессе адаптации и корректировки стратегий возникает также необходимость решения следующих задач.

- Определить момент корректировки стратегий. С этой целью можно использовать многомерные стратегические матрицы, предложенные в работах [3, 6, 7] как расширение матричных моделей стратегического планирования. Тогда моментом корректировки будет тот момент, когда текущая фактическая траектория системы $y^T(t)$ впервые окажется в каком-либо квадранте многомерной матрицы, отличном от тех, через которые должна проходить построенная ранее плановая траектория $\bar{y}^T(t)$.
- Обеспечить оптимальность новой стратегии. Пусть P_1 , G_1 и S_1 — соответственно старые исходное, целевое состояния системы и ее стратегия, P_2 , G_2 и S_2 — новые исходное, целевое состояния системы и ее стратегия, а G_3 — будущее состояние системы при реализации существующей стратегии, причем для каждого квадранта многомерной стратегической матрицы заданы все возможные элементарные стратегии [3, 6, 7], переводящие систему в соседние квадранты.

Для формирования новой стратегии S_2 может быть поставлена задача планирования в многомерном пространстве стратегических позиций: требуется построить последовательность элементарных стратегий минимальной стоимости, переводящих систему из точки P_2 в точку G_2 с учетом тенденций ее фактического движения в точку G_3 и с учетом прежней цели G_1 . Для этого могут быть применены методы и алгоритмы, предложенные для синтеза семантических моделей расчетных программ [3, 6, 7].

8. СТРАТЕГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Проблемы реализации стратегии, выявляемые в процессе мониторинга, зачастую обусловлены не ошибками стратегического планирования, а свойствами сложных систем, к каковым относятся

РСЭС, что подтверждается результатами, полученными в синергетике [18, 19].

- В пространстве состояний каждой системы есть так называемая область готовности, отражающая возможности адаптации системы. Если изменения параметров системы превышают возможности ее адаптивного развития, то происходит потеря устойчивости системы. А если цели РСЭС лежат вне области готовности, то они либо не будут достигнуты, либо будут достигнуты с большими затратами.
- Другие важные области пространства состояний системы представляют собой области притяжения (бассейны) аттракторов — таких точек в пространстве состояний, что любая фазовая траектория системы, начальное состояние которой находится в области притяжения аттрактора, обязательно стремится к аттрактору.
- Для сложных систем характерно свойство эквивалентности: динамическая система может приходить различными путями из различных начальных состояний в одно и то же финальное состояние, определяемое внутренней структурой системы (независимо от начального состояния и изменений среды).
- Траектория развития сложных систем время от времени проходит точки бифуркации, в которых система чувствительна к малым внешним возмущениям и случайным образом может перейти на одну из нескольких новых траекторий развития. В таких точках система максимально управляема и может быть направлена на нужную траекторию минимальным правильным и своевременным воздействием.
- Системы неустойчивы на стадии режимов с обострением, когда за конечное время происходит неограниченный рост значений параметров системы в силу возбуждения нелинейной положительной обратной связи; в таких режимах система находится в стадии асимптотической неустойчивости и возникает угроза ее распада.
- При реализации стратегии важно знать, является ли РСЭС допустимой системой [20], в которой уровень системных патологий и дисфункций, возникающих как результат нарушения принципов построения систем и общесистемных закономерностей, не превышает заданного. В противном случае РСЭС является «не совсем системой» в смысле выполнения цели ее функционирования, что существенно уменьшает как управляемость системы, так и ее способность к самоорганизации.
- Как и любая система, РСЭС обладает собственной циклической динамикой, возникающей в результате наложения и взаимодействия раз-



личных циклов — как глобальных, так и присущих самой системе. Поэтому следует определять стратегические цели и стратегии их достижения не только исходя из потребностей развития РСЭС, но и с учетом того, не противоречат ли они данной циклической динамике и трендам развития системы.

- Как сложная открытая система РСЭС имеет нелинейную траекторию движения и переходит из одних неустойчивых областей в другие; при этом периоды стабильного развития (траектория движения системы хорошо прогнозируется, но с трудом корректируется) сменяются периодами развития кризисных ситуаций (наоборот).

Перечисленные особенности РСЭС как сложной открытой нестационарной системы отражаются на специфике процесса стратегического контроля и мониторинга реализации стратегий: необходимо учитывать внутренние тенденции развития системы и тот факт, что не всякая поставленная цель развития системы и стратегия ее достижения реально осуществимы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективный стратегический контроль позволяет обеспечить достижение основных стратегических целей развития региональной социально-экономической системы, среди которых важнейшая — это обеспечение ее устойчивого развития. При устойчивом развитии, как известно, удовлетворяются потребности настоящего времени, но не ставится под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои потребности. Поэтому устойчивость развития — более важная стратегическая цель для РСЭС, чем экономический рост и повышение качества жизни населения, а ведущей парадигмой регионального развития должна быть концепция устойчивого развития РСЭС — социально справедливого, экономически эффективно и экологически безопасного в силу природы региона как единой социально-эколого-экономической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хачатуров В.Р.* Математические методы регионального программирования. — М.: Наука, 1989. — 304 с.
2. *Маргулов Р.Д., Хачатуров В.Р., Федосеев А.В.* Системный анализ в перспективном планировании добычи газа. — М.: Недра, 1992. — 287 с.
3. *Соломатин А.Н.* Модели и средства автоматизации стратегического управления газодобывающими предприятиями. — М.: ВЦ РАН, 2005. — 40 с.
4. *Зуб А.Т.* Стратегический менеджмент. Системный подход. — М.: Генезис, 2011. — 847 с.
5. *Экономическая стратегия фирмы* / Под ред. А.П. Градова. — 3-е изд. — СПб.: СпецЛит, 2000. — 589 с.
6. *Соломатин А.Н., Хачатуров В.Р.* Математическое моделирование в стратегическом управлении регионом. — М.: ВЦ РАН, 2007. — 60 с.
7. *Соломатин А.Н.* Разработка многомерных многоуровневых моделей стратегического управления регионом // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2009): Тр. третьей междунар. конф. / ИПУ РАН. — М., 2009. — С. 104—116.
8. *Стратегическое управление. Регион, город, предприятие:* монография / Под ред. Д.С. Львова и др. — 2-е изд. — М.: Экономика, 2005. — 603 с.
9. *Сангадиева И.Г.* Методология стратегического управления регионом. — Красноярск, 2006. — 260 с.
10. *Васильев С.Н., Цвиркун А.Д.* Проблемы управления развитием крупномасштабных систем (MLSD'2007): Тр. первой междунар. конф. / ИПУ РАН. — М., 2007. — С. 9—14.
11. *Соломатин А.Н., Хачатуров В.Р.* Мониторинг реализации и адаптация стратегий регионального развития. — М.: ВЦ РАН, 2008. — 40 с.
12. *Ириков В.А.* Методы программно-целевого управления, включая бюджетирование, ориентированное на результат: Уч.-метод. пособие. — М.: РосНОУ, 2007.
13. *Гапоненко А.Л.* Стратегия социально-экономического развития: страна, регион, город. — М.: Изд-во РАГС, 2001. — 224 с.
14. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Основы теории систем и системного анализа. — 2-е изд. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. — 512 с.
15. *Прангизвили И.В.* Системный подход и общесистемные закономерности. — М.: СИНТЕГ, 2000. — 528 с.
16. *Могилевский В.Д.* Методология систем: вербальный подход. — М.: Экономика, 1999. — 251 с.
17. *Хачатуров В.Р., Хачатуров Р.В.* Математическое моделирование и динамическое проектирование в нефтегазодобывающей промышленности // Наука и техника в газовой промышленности. — 2008. — № 2. — С. 3—22.
18. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Основания синергетики. — М.: КомКнига, 2005. — 240 с.
19. *Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика и прогнозы будущего. — М.: Эдиториал УРСС, 2001. — 288 с.
20. *Соломатин А.Н.* Построение допустимых крупномасштабных систем как условие их управляемости и самоорганизации // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2010): Труды четвертой междунар. конф. / ИПУ РАН. — М., 2010. — Т. 1. — С. 18—26.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Д. Цвиркуном.

Соломатин Александр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, ✉ a.n.solomatin@bk.ru,

Хачатуров Владимир Рубенович — д-р физ.-мат. наук, зав. отделом, ✉ vladimir.khachaturov@rambler.ru,

Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН
Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление» Российской академии наук,
г. Москва.

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Н.Л. Соколов, П.А. Захаров

Рассмотрены вопросы создания и развития информационно-аналитического обеспечения систем поддержки принятия автономных решений в процессе управления КА. Предложена структура системы, где наряду с традиционными блоками — базой знаний и машиной логических заключений введены новые элементы — блок моделирования и прогнозирования состояния бортовой аппаратуры, блок идентификации полетных ситуаций. Дана формальная постановка задачи автономного управления КА. Разработаны общие принципы взаимодействия структурных элементов системы в процессе выработки рекомендаций по принятию автономных решений. Приведены примеры использования информационно-аналитического обеспечения систем управления для парирования возникающих нештатных ситуаций.

Ключевые слова: автономная система, управление, космический аппарат, база знаний, машина логических заключений, идентификация, нештатная ситуация, моделирование, прогнозирование, состояние, бортовая аппаратура, принятие решений.

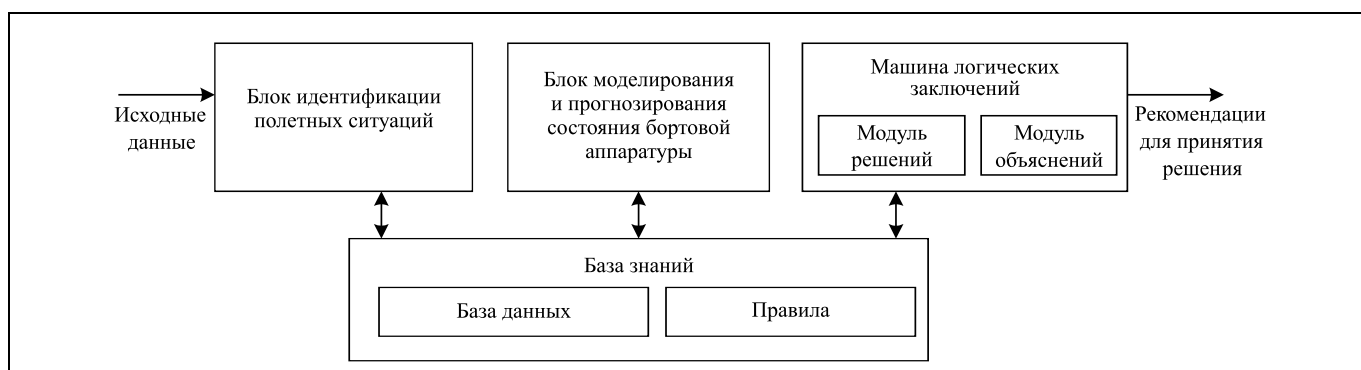
ВВЕДЕНИЕ

В условиях планируемого расширения состава орбитальных группировок космических аппаратов (КА), усложнения спектра решаемых ими задач и увеличения нагрузки на средства наземного автоматизированного комплекса управления возрастают объективная необходимость и значимость автономного управления КА. Указанные обстоятельства выдвигают на первый план проблему создания и развития информационно-аналитического обеспечения систем поддержки принятия автономных управленческих решений.

Особо важное значение эта проблема приобретает при управлении КА в процессе парирования нештатных ситуаций. Практика управления орбитальными КА показывает, что в ряде случаев только своевременная выдача в сеансах связи с КА команд немедленного исполнения позволяет предотвратить развитие нештатных ситуаций. При этом возникает необходимость в условиях жестких временных ограничений (продолжительность сеансов связи с КА, движущихся на высотах и менее

1000 км, составляет не более 15 мин) провести оперативный анализ и диагностику состояния бортовых систем КА, идентифицировать содержание нештатной ситуации, определить парирующую программу управления, выдать ее на борт КА и оценить факт исполнения командных воздействий.

Анализ существующих отечественных и зарубежных материалов показал отсутствие общего методологического подхода к созданию высокоэффективных систем поддержки принятия автономных управленческих решений. Известен ряд работ, где приводятся примеры решения лишь частных задач автономного управления КА [1–5]. В них описывается система парирования нештатных ситуаций и оптимального управления КА Deep Space One [1], рассмотрена система Optimum-AIV [2], исследуются вопросы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций [3, 4], приводится обоснование архитектуры и управляемости дискретных динамических систем [5–7], представлены варианты базы знаний и основные алгоритмы функционирования интеллектуальных систем [8–10].



Структурная схема системы управления КА

Одно из важнейших условий достижения заданных целей заключается в эффективной идентификации текущего состояния КА и внешней среды. Кроме того, проектируемая система должна обеспечивать возможность оперативного формирования и реализации (при необходимости) корректирующих программ управления, направленных на парирование негативных факторов. Исходными данными, поступающими на систему, служат предполагаемые к выдаче на борт КА штатные программы управления, телеметрическая информация о состоянии работоспособности бортовой аппаратуры КА, измерительные данные, получаемые бортовыми средствами. Выходными данными являются рекомендации для принятия решений по устранению нештатных ситуаций.

Отметим, что общая тенденция развития автономных систем, в том числе основанных на использовании элементов искусственного интеллекта, состоит в разработке средств и методов, направленных на достижение задаваемых целей управления в условиях динамически меняющихся полетных ситуаций. Анализ создания динамических систем показал, что, несмотря на определенные различия в структурном построении этих систем, их общим элементом является база знаний, а основным условием принятия эффективных управленческих решений — создание и развитие базовых решающих правил. Это позволяет обеспечить координацию всех элементов системы в процессе управления объектом и планирования операций в условиях динамически изменяющихся полетных ситуаций.

1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ АУТОНОМНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Основным блоком системы, представленной на рисунке, является база знаний, включающая в себя базу данных и совокупность решающих правил.

База данных представляет собой программную структуру, содержащую множество событий S в виде объектов O , атрибутов A и их значений Z : $S = \langle O, A, Z \rangle$. Например: событие «угол атаки космического аппарата в системе управления движением равен 20° » включает в себя атрибут «угол атаки», объект — «система управления движением» и значение — 20° . Решающие правила $S(U)$ устанавливают соотношения между событиями и действиями в виде: «если S , то U ». В общем случае одно правило может соответствовать наступлению нескольких событий. Выполнение правил направлено на достижение целей функционирования интеллектуальной системы, обозначенных в исходных данных.

Блок идентификации полетных ситуаций предназначен для определения характеристик текущего положения КА и состояния бортовой аппаратуры, их сравнение с прогнозируемыми параметрами, выявления признаков возникновения нештатных ситуаций и необходимости корректировки программ управления.

Блок моделирования и прогнозирования функционирования КА предназначен для определения эталонных характеристик состояния бортовых систем при «идеальном» исполнении выдаваемых на борт КА командных воздействий. Эти эталонные характеристики сравниваются с реальными параметрами бортовой аппаратуры на основе анализируемой телеметрической информацией. По результатам сравнения делаются выводы об исполнении программ управления КА и о состоянии работоспособности бортовой аппаратуры.

Машина логических заключений включает в себя модуль поиска решений и модуль объяснения хода решений. Модуль решений осуществляет автоматизированный поиск последовательности принимаемых решений по выходу из возникающих нештатных ситуаций. Модуль объяснений последовательно информирует оператора системы о логике всех шагов решения задач.

2. ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целевое назначение системы управления — обеспечение автономного парирования возникающих нештатных ситуаций в работе КА и его бортовой системы, а также негативных тенденций в динамике полета аппарата. В частности, система должна оперативно выполнять функции:

- восстанавливать работоспособность бортовой аппаратуры;
- корректировать траектории полета КА при отклонениях параметров его движения от номинальных значений;
- выявлять признаки возникновения негативных тенденций и вырабатывать управленческие решения по их устранению и др.

Отметим значительные различия в содержании возможных негативных ситуаций, способах их парирования, критериях достижения целевых функций и ряда других факторов, влияющих на функционирование системы. Для структурирования изложения предлагаемого подхода к принятию автономных управленческих решений приведем формальную постановку исследуемой задачи.

Введем обозначения:

$X_p = \{x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_n\}$ — вектор реального состояния КА и работоспособности бортовой аппаратуры в текущий момент времени, значения x_i могут быть определены как на основе получаемой телеметрической информации, так и с помощью проводимых измерений и их обработки. К значениям x_i относятся траекторные параметры движения КА, параметры состояния отдельных элементов бортовых систем, данные об околоземном пространстве и т. д.;

$X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_n\}$ — вектор прогнозируемых значений соответствующих параметров x_i при штатной работе КА;

x_{imin}, x_{imax} — минимально и максимально допустимые значения i -го параметра.

$S_i(u)$ — базовые решающие правила, устанавливающие логические или функциональные соотношения между событиями S , характеризующие состояния КА и его бортовой аппаратуры, и воздействиями на КА и полетные ситуации; при проектировании системы реализуется направленность на максимальный охват базовыми правилами возможных полетных ситуаций;

$J = \sum_{i=1}^n a_i (x_{ip} - x_{in})^2$ — критерий достижения целевых функций, характеризующий различие между реальными и прогнозируемыми (желаемыми) векторами X_p и X_n , a_i — весовые коэффициенты,

устанавливающие приоритетность каждой из компонент вектора целей.

Итак, сформулируем задачу, решаемую системой в процессе принятия управленческих решений.

Путем сравнения реального вектора текущего состояния КА X_p , идентифицируемого на основе получаемой телеметрической информации и обработанных измеренных бортовой аппаратурой данных, с соответствующим вектором прогнозируемого (желаемого) состояния X_n выявляются отклонения компонент $x_i = x_{ip} - x_{in}$ и устанавливается факт наличия или отсутствия нештатных ситуаций и признаков возникновения негативных тенденций функционирования КА.

Из общей последовательности параметров x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, выбираются те составляющие, для которых справедливы неравенства $x_{ip} > 0,8x_{imax}$ и $x_{ip} < 1,2x_{imin}$, и с их учетом формируется критерий достижения целевых функций J .

Из всей совокупности базовых решающих правил $S_i(u)$ составляется такая программа управления, при которой обеспечивается минимум функционала J на последующем временном интервале $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. Правильность выбора программ подтверждается путем оценки результатов прогнозирования параметров движения КА, полученных после подачи командных воздействий.

Таким образом, система управления КА предназначена для автономного выполнения:

- идентификации полетных ситуаций и выявление признаков возникновения негативных тенденций функционирования КА;
- выработки программ управления, устраняющих нештатные ситуации;
- прогнозирования траектории движения КА и подтверждения правильности принятия управленческих решений.

Анализ возможных полетных ситуаций, влияющих на содержание и оперативность выработки управляющих решений, позволяет ранжировать состояние системы следующим образом:

— «неопасные ситуации» — КА и бортовые системы функционируют в условиях, когда характеризующие их работоспособность параметры x_{ip} находятся в допустимых пределах и в гарантированном удалении от граничных значений: $1,2x_{imin} < x_{ip} < 0,8x_{imax}$;

— «опасные ситуации» — функционирование КА и бортовых систем характеризуется состоянием, когда параметры x_{ip} находятся в допустимых пределах, но достаточно близко к граничным значениям $x_{ip} < 1,2x_{imin}$, $x_{ip} > 0,8x_{imax}$;



— «аварийные ситуации» — КА и бортовые системы работают в условиях, когда часть параметров x_{ip} вышла за пределы допустимых значений $x_{ip} < x_{imin}$, $x_{ip} > x_{imax}$.

Ранжирование состояния системы по оперативности принятия решений заключается в наличии двух основных ситуаций:

— «без резерва времени» — ситуации, требующие выработки и реализации управленческих решений с помощью командных воздействий немедленного исполнения. К таким случаям относятся практически все «аварийные ситуации», а также «опасные ситуации» с высоким уровнем динамики нарастания негативных тенденций;

— «с резервом времени» — ситуации, предполагающие выработку наилучшей из допустимых стратегий, направленных на перемещение параметров x_i от границ допустимых значений. К ним относятся практически все «опасные ситуации».

3. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗОВЫХ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ

Основой формируемой базы знаний и важнейшим фактором построения эффективных систем является создание совокупности базовых решающих правил, определяющих логические соотношения между идентифицированными полетными состояниями КА и программами управления, обеспечиваемыми нахождением бортовых систем в работоспособном состоянии.

Прежде всего, такие соотношения формируются на основе эксплуатационной документации на КА при возникновении идентифицированных нештатных ситуаций. Кроме того, осуществляется расширение поля соотношения $S(U)$ путем:

— создания новых комбинаций командных воздействий, не предусмотренных эксплуатационными документами; например, для компенсации возможных не санкционированных включений элементов бортовой аппаратуры;

— идентификации вновь возникающих нештатных ситуаций в процессе эксплуатации КА и поиска новых программ управления для парирования этих ситуаций;

— имитации процессов функционирования бортовых систем при воздействии на КА различных программ управления; в результате выбираются соотношения $S(U)$, представляющие интерес в смысле зрения восстановления работоспособности КА;

— поиска нетрадиционных способов управления; например, использование поворотов панелей солнечных батарей для управления системой ориентации КА «Океан-О».

Во всех рассмотренных случаях, кроме последнего, поле соотношений $S(U)$ расширяется в условиях детерминированной модели состояния работоспособности бортовых систем. В последнем случае параметры решающих правил корректируются в зависимости от сложившихся ситуаций.

Вместе с тем, могут возникать такие полетные ситуации, при которых практически невозможно заранее сформулировать решающие правила. Например, при входе в атмосферу Земли и планет условия полета КА могут отличаться от номинальных в достаточно широких пределах по значительному числу параметров: крутизне траектории, скорости полета, нарастанию перегрузки, плотности атмосферы и др. Число сочетаний всех возможных отличительных вариантов практически не ограничено, и заранее определить все соответствующие корректирующие программы управления не представляется возможным. Для этих случаев решающие правила составляются в виде функциональных аналитических зависимостей, определяющих квазиоптимальные управляющие воздействия как функцию от текущих траекторных параметров КА.

4. БЛОК ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЕТНЫХ СИТУАЦИЙ

Блок предназначен для определения характеристик текущего положения КА, состояния работоспособности бортовых систем и оценки параметров внешней среды. Для этого могут быть применены различные бортовые измерительные средства: датчики угловых скоростей, звездные датчики, инфракрасные вертикали, гироскопические системы и др.

Кроме того, с помощью блока реальные текущие параметры движения КА сравниваются с прогнозируемыми, выявляются признаки возникновения и развития нештатных ситуаций. В результате выявляется необходимость в выработке управляющих воздействий для корректировки траектории полета КА.

Полученные с помощью блока идентификации полетной ситуации результаты являются исходными для формирования решающих правил и прогнозирования состояния бортовой аппаратуры.

5. БЛОК МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

Блок моделирования и прогнозирования формируется последовательно в два этапа. На первом этапе составляется общая структура блока с учетом особенностей построения бортовой аппарату-

ры КА. Приводится описание всех бортовых систем КА. Для каждой системы описываются:

- состав, структура, комплектность;
- перечень и параметры предусматриваемых функциональных режимов;
- телеметрические параметры, их номинальные и допустимые значения;
- управляющие воздействия, подаваемые на систему в виде разовых и программных команд;
- ограничения на последовательность выдаваемых команд и временные интервалы между командами;
- запреты на выдачу командных воздействий.

Учитывая, что номинальные состояния бортовых систем определяются режимами командных воздействий на эти системы, прежде всего прогнозируются «эталонные» состояния бортовой аппаратуры, характеризующие совокупностями телеметрических параметров в зависимости от режимов выдаваемых командных воздействий.

Результат, полученный с помощью блока моделирования и прогнозирования, позволяет дать описание изменения состояния служебных систем КА для любого набора допустимых, распределенных по времени управляющих воздействий $U(t)$ т. е. моделируется «эталонный» вариант функционирования систем в отсутствие ошибок управления, отказов в работе бортового оборудования и случайных возмущающих воздействий.

Структурная схема блока обеспечивает возможность автоматизированных проверок на идентификацию команд допустимому множеству и логику выдаваемых последовательностей командных воздействий. Существование процесса тонкой корректировочной настройки исходных данных представляет расширенные возможности, в том числе добавления новых режимов регулирования; внесения дополнительных ограничений в логику выдаваемых на борт команд; хранения, архивации, документирования, а также графического отображения состояния служебных систем КА.

Таким образом, применение блока моделирования и прогнозирования позволяет получить последовательность эталонных значений телеметрических параметров в процессе имитации подаваемых на борт КА, управляющих воздействий $U(t)$.

На втором этапе в целях идентификации и диагностики работоспособности бортовой аппаратуры проводится сравнительный анализ эталонных вариантов параметров телеметрии с ее реальными значениями, при проведении сеансов связи, для всех служебных систем КА.

Идентификация состояния функционирования служебных систем выражается в наличии либо отсутствии признаков возникновения нештатных ситуаций для системы в целом. Заложенная в сис-

тему возможность детального анализа работоспособности отдельных элементов, составляющих бортовую систему КА, делает возможным выявление элементов конкретных подсистем, которые служат причиной нарушения нормальной работоспособности всей системы.

Диагностика работоспособности бортовой аппаратуры служебных систем КА заключается в:

- выявлении отрицательных тенденций в работе как бортовой системы в целом, так и отдельных элементов, в том числе для элементов, находящихся в работоспособном состоянии. Так, например, выявление нехарактерного роста (или снижения) характеристик температурных режимов, увеличение времени заряда химической батареи, уменьшение мощности командной радиолинии при передаче с борта КА телеметрии и др.;

- прогнозировании временных интервалов штатной работы служебных систем без применения корректирующих командных воздействий;

- диагностировании и предупреждении возможных причин негативных тенденций. Так, например, если объем наработок бортовой аппаратуры превышает гарантированные параметры, если повышается интенсивность эксплуатации систем и др.;

- выявлении взаимно коррелированных процессов (в том числе и негативных) при работе различных служебных систем КА.

Таким образом, в результате исполнения указанных выше функций дается всесторонняя объективная оценка функционирования служебных систем с предполагаемой динамикой развития процессов на борту КА и прогнозируется время штатной работы всех элементов подсистем, диагностируются «проблемные» узлы бортовой аппаратуры.

6. ТЕХНОЛОГИЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПАРИРОВАНИИ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ

Практика показывает, что при управлении КА достаточно часто (особенно при управлении аппаратами за пределами гарантийных сроков их эксплуатации) возникают нештатные ситуации в работе бортовой аппаратуры, что вызывает необходимость в разработке и применении алгоритмов восстановления ее работоспособности.

Одним из наиболее ярких примеров возникновения и парирования нештатных ситуаций служит восстановление работоспособности в работе системы ориентации КА «Океан-О» [11]. В процессе управления КА оказалась неэффективной штатная схема разгрузки двигателя-маховика в канале тангажа при значительных колебаниях плотности атмосферы, в том числе из-за возникновения силь-



ных магнитных бурь. В этих условиях двигатель-маховик выходил в режим насыщения и не обеспечивал необходимые воздействия, компенсирующие влияние возрастающих аэродинамических моментов. В результате КА выходил в неориентированный режим полета, не обеспечивающий возможности выполнения целевых программ.

Для поддержания ориентации КА была предложена принципиально новая технология разгрузки двигателя-маховика, основанная на периодических коррекциях положения солнечной батареи (СБ). На ее основе разработаны методы и алгоритмы расчета корректирующих параметров положения СБ, обеспечивающие заданную ориентацию КА в условиях сохранения необходимого энергобаланса. Был организован автоматизированный технологический цикл по принятию решений в многомерной задаче: 1) поддержания ориентации КА; 2) обеспечения требуемого энергобаланса; 3) выполнения заданной программы полета.

Решение этих задач носит компромиссный характер. Так, выполнение третьей задачи реализуется только при необходимом режиме энергопотребления, что достигается лишь в определенных диапазонах значений углов поворота солнечной батареи. Однако при некоторых значениях этих углов невозможно поддержание необходимой ориентации КА. В таких случаях приоритет в принятии управленческих решений отдается решению первой задачи с необходимой коррекцией программы получения целевой информации.

Опишем процесс принятия управленческих решений, который состоит из трех основных этапов.

Этап 1. С помощью средств блока идентификации полетных ситуаций в текущие моменты времени определяется необходимость (или ее отсутствие), поворота солнечной батареи. Исходной информацией служат телеметрические параметры, характеризующие положение V_z , а также скорость изменения кинетического момента двигателя-маховика ΔV_z . Величина ΔV_z рассчитывается как частное от деления разности между значениями V_z на двух последующих сеансах связи с КА на число витков n и m между проводимыми измерениями:

$$\Delta V_z = \frac{V_z(n) - V_z(m)}{n - m}.$$

Принималось, что крайним условием, при котором отсутствует необходимость поворота СБ, является достаточно большая удаленность телеметрического параметра V_z от его предельного значения $V_z^* = \pm 20$ Нмс (например, если $V_z \geq -0,8V_z^*$ или $V_z \leq 0,8V_z^*$) в сочетании с малыми скоростями

изменения параметра V_z (например, если $\Delta V_z \leq 0,8$ Нмс/вит). Приведенные неравенства обусловлены тем, что при указанных значениях V_z и ΔV_z скоординировать положение СБ представляется целесообразным в процессе проведения следующих сеансов связи с КА.

Дадим описание событиям S_i , характеризующим состояние функционирования двигателя-маховика:

$$S_1: V_z \geq -0,8V_z^*;$$

$$S_2: V_z \leq 0,8V_z^*;$$

$$S_3: \Delta V_z \leq 0,8 \text{ Нмс/вит}.$$

Сформулируем условия, определяющие необходимость (или ее отсутствие) поворота СБ:

если $(S_1 \wedge S_2) \vee (S_2 \wedge S_3)$, то $\Delta \text{УПСБ} = 0$ или

если $\bar{S}_1 \vee \bar{S}_2 \vee \bar{S}_3$, то $\Delta \text{УПСБ} \neq 0$.

Здесь $\Delta \text{УПСБ}$ — угол поворота СБ.

Итак, блок идентификации полетных ситуаций выдает на машину логических заключений формализованную информацию, из которой следует однозначный вывод о схеме управления СБ. Далее будем рассматривать случаи, где осуществляется поворот СБ для поддержания ориентации КА.

Этап 2. На основе полученной информации о необходимости коррекции положения СБ на средствах машины логических заключений определяется направление и потребное значение угла поворота $\Delta \text{УПСБ}$. Сначала устанавливается близость значения V_z к одному из двух граничных положений: к $V_z^* = 20$ Нмс или к $V_z^* = -20$ Нмс. В первом случае необходимо осуществлять поворот в сторону уменьшения угла между плоскостью СБ и скоростным потоком, что обеспечит возможность снижения действия возмущающего аэродинамического момента на КА. Соответственно, во втором случае разворот СБ осуществляется в противоположную сторону, что характеризует факт восстановления плотности атмосферы после прохождения ее пиковых значений.

Угол поворота $\Delta \text{УПСБ}$ определяется из условия «перемещения» параметра V_z как можно ближе к наиболее удаленному граничному положению V_z^* . Это дает возможность создания максимально возможного интервала времени для перемещения двигателя-маховика к критическому состоянию. Так, например, при значении параметра $V_z = 18$ Нмс угол поворота СБ $\Delta \text{УПСБ}$ должен обеспечить приращение параметра ΔV_z на 38 Нмс. Это дает воз-

возможность определить время поворота СБ в соответствии с зависимостью $\Delta t = \alpha \Delta V_z / V_{\text{СБ}}$, где $V_{\text{СБ}}$ — скорость поворота солнечной батареи, α — коэффициент динамики поворота СБ.

Рассчитанные данные поступают в базу знаний, средствами которой вырабатываются базовые решающие правила, обеспечивающие парирование сложившейся нештатной ситуации. Для рассмотренного конкретного случая результатом выработки решения являются следующие правила: осуществляется подача разовой команды РК429 для поворота солнечной батареи в сторону уменьшения угла ДУПСБ, а через рассчитанный временной интервал Δt подают другую команду РК430 для остановки движения СБ. Далее, посредством передачи рекомендуемых решающих правил через машину логических заключений на блок моделирования и прогнозирования параметров движения КА осуществляют проверку правильности выбранных решений с учетом обеспечения необходимого энергобаланса КА для выполнения заданной программы полета.

Этап 3. С учетом полученной информации о рекомендуемой программе поворота СБ определяется достаточность энергоснабжения на КА при расчетном угле ДУПСБ для выполнения запланированных операций программы полета. Отметим, что при недостаточном энергобалансе КА аккумуляторные батареи могут разрядиться до критического уровня, что также сопряжено с переходом аппарата на нештатный неориентируемый режим полета.

Условие достаточности энергобаланса КА может быть определено выражением:

$$W(\text{УПСБ}) \geq W(\Pi) = \sum_i^n W_i$$

где $W(\text{УПСБ})$ — значение энергопотребления КА при заданном угле поворота солнечной батареи, $W(\Pi)$ — требуемый энергетический расход для отработки всех запланированных операций программы полета, W_i — энергопотребление КА при выполнении i -й операции, n — число операций, выполняемых в соответствии с программой полета.

Учитывая, что приоритет при формировании программы полета следует отдавать обеспечению штатной ориентации КА, в случаях нарушения указанного неравенства из совокупности запланированных операций работы бортовой аппаратуры исключается ряд операций до обеспечения удовлетворительного энергетического баланса аппарата. Причем, не исключаются операции, связанные с обеспечением жизнедеятельности аппарата (командно-измерительная система, система терморегулирования, система стабилизации). В этих

условиях исключаются операции, направленные на выполнение целевой программы получения специальной научной информации. В результате обеспечивается нормальное функционирование бортовых систем КА, а исключенные операции реализуются в рамках последующих программ полета. После соблюдения условий выполнения достаточности требуемого энергобаланса реализуется программа управления положением солнечной батареи с целью поддержания штатной ориентации КА.

Таким образом, разработанный и внедренный в практику управления КА «Океан-О» описанный алгоритм поддержки принятия решений позволил обеспечить устранение нештатной ситуации, связанной с нарушением работоспособности системы ориентации аппарата. В результате была выполнена программа получения целевой информации, аппарат эксплуатировался в течение 33 мес при гарантийном сроке, равном 12 мес. Несмотря на то, что описанный случай уникален в практике управления автоматическими КА, рассматриваемый методический подход может быть распространен для принятия автономных решений при эксплуатации аппаратов других типов и назначений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены примеры эффективного применения информационно-аналитического обеспечения систем управления КА в процессе парирования нештатных ситуаций. Даны обоснование перспективных направлений развития систем и формальная постановка задачи автономного управления. Описано новое структурное построение системы: система состоит из четырех основных блоков: блока идентификации полетных ситуаций, предназначенного для сравнения текущих состояний КА и внешней среды от прогнозируемых; блока моделирования и прогнозирования состояния бортовой аппаратуры КА, позволяющего оценить динамику развития тенденций (в том числе и негативных) функционирования элементов КА; базы знаний, содержащей непрерывно накапливающееся поле соотношений между состояниями бортовых систем КА и базовыми решающими правилами; машины логических заключений, разрабатывающей и обосновывающей суть рекомендаций по устранению нештатных ситуаций.

Заложенные в систему возможности прогнозирования различных динамических режимов движения КА дают возможность принятия оперативных решений, в том числе в условиях быстроменяющихся полетных ситуаций и в условиях неопределенности.



К элементам новизны разработок следует отнести технологию принятия управленческих решений при устранении нештатных ситуаций в системе ориентации КА, нацеленность многоэтапного процесса формирования программ управления КА на достижение задаваемых целей управления, составление решающих правил в виде аналитических зависимостей от текущего положения КА. Это существенно расширяет возможности по принятию управленческих решений.

Предложенный подход может быть распространен на разработку информационно-аналитического обеспечения систем управления КА различных типов и назначений.

Внедрение информационно-аналитического обеспечения принятия управленческих решений в практику управления автоматическими КА обеспечивает значительный резерв в повышении надежности, оперативности и эффективности управления и эксплуатации КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bhaskaran S., Riedel J.E., Synnott S.P., Wang T.C. The Deep Space 1 Autonomous Navigation System: A Post-flight Analysis, AIAA 2000-3935, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Denver, CO, August 2000.
2. Arentoft M.M., Fuchs J.J., Parrod Y., Gasquet A., Stader J., Stokes I., Vadon H. OPTIMUM-AIV: a planning and scheduling system for spacecraft AIV // Future Generation Computer Systems — Special issue: artificial intelligence and space. — May, 1992. — P. 403–412.
3. Соколов Н.Л. Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций // Успехи современного естествознания. — 2007. — № 6. — С. 16–20.
4. Подиновская О.В., Подиновский В.В. Анализ иерархических многокритериальных задач принятия решений методами теории важности критериев // Проблемы управления. — 2014. — № 6. — С. 2–8.
5. Осипов Г.С. Лекции по искусственному интеллекту. — М.: Либроком, 2014. — 272 с.
6. Осипов Г.С. Динамические интеллектуальные системы // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2008. — № 1. — С. 47–54.
7. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. — М.: Наука, 2006. — 333 с.
8. Рассел С., Норгвинг П. Искусственный интеллект. Современный подход. — М.: Вильямс, 2015. — 1408 с.
9. Бессмертный И.А. Контекстный подход к оценке количества информации в базах знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2013. — № 3. — С. 40–47.
10. Кулаков С.М., Трофимов В.Б. Интеллектуальные системы управления технологическими объектами: теория и практика (монография) // Успехи современного естествознания. — 2010. — № 2. — С. 101–102.
11. Соколов Н.Л. Принятие решений по управлению автоматическими КА в условиях нештатных ситуаций // Успехи современного естествознания. — 2007. — № 7. — С. 99–104.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Соколов Николай Леонидович — канд. техн. наук, нач. отдела, ✉ snl@mcc.rsa.ru,

Захаров Павел Александрович — вед. инженер, ✉ zaxarovp@gmail.com,

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, г. Королев.

Содержание сборника «Управление большими системами», 2015, вып. 57

- ✓ **Беленький А.С., Болкунов Д.С.** Теоретико-игровой подход к анализу перспектив развития системы электроснабжения региона
- ✓ **Иванов Р.В., Михальский А.И., Иванов В.К. и др.** Об идентификации параметров заболеваемости в модели с гетерогенностью: случай полной и неполной информации
- ✓ **Каштанов В.А., Кондрашова Е.В.** Исследование полумарковских систем массового обслуживания при управляемом входящем потоке BSMAP-поток
- ✓ **Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю.** Модели и алгоритмы минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий
- ✓ **Лазарев А.А., Корнев П.С., Сологуб А.А.** Метрика для задачи минимизации суммарного запаздывания
- ✓ **Стецюра Г.Г.** Быстрые способы выполнения параллельных алгоритмов в цифровых системах с динамически формируемой сетевой структурой связей
- ✓ **Усик Е.В.** Оптимизация нелинейных каскадных систем в форме Лурье при ограниченных внешних возмущениях

Тексты статей доступны на сайте <http://ubs.mtas.ru/>



ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ЯДРА В ОДНОКЛАССОВОМ МЕТОДЕ ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

А.Н. Будынков, С.И. Масолкин

Рассмотрен вариант одноклассового метода опорных векторов, который применяется в случаях, когда недоступен достаточный объем данных для классификации аномальных режимов работы технических объектов. Исследованы три процедуры оценки параметра специальной функции, называемой ядром, две из которых известны: функция перекрестной проверки и функция максимума дисперсии, а третья предложена авторами как модификация последней процедуры, когда минимизируется функционал энтропии для матрицы ядра. Показано, что предложенная процедура позволяет получить сравнимое с первой качество классификации без учета числа выбросов в обучающей последовательности и обеспечить меньшее значение параметра ядра.

Ключевые слова: классификация, метод опорных векторов, ядро, энтропия.

ВВЕДЕНИЕ

Для многих современных технических объектов, например, авиационных двигателей, актуальна проблема оценки их состояния и выявление аномалий в работе. В большинстве случаев достаточно факта обнаружения аномальности, вне зависимости от причины, что позволяет избежать разрушения объекта и сохранить его для анализа причины аномального поведения. Оценка состояния объекта всегда основана на сравнении текущего состояния объекта с эталонным, установленным по некоторой модели. При испытании опытных образцов и уникальных объектов прямое представление знаний об объекте испытаний в виде формальной модели или экспертных заключений не всегда возможно. Препятствиями могут быть сложность и недостаточная изученность объекта испытаний, недоступность информации о его конфигурации и технических характеристиках в силу ее конфиденциальности. В таких случаях применяют информационно-ориентированные методы, с помощью которых синтезируют модель на основе данных, собранных в процессе эталонной работы и используемых в качестве обучающей последовательности, на которой и строится модель, служащая для проведения диагностики объекта в про-

цессе его функционирования. Обзор и анализ таких алгоритмов можно найти в работах [1—4] и др.

В настоящей работе рассмотрен вариант метода опорных векторов (support vector machine — SVM) [1], который применяется, когда не доступен достаточный объем данных для классификации аномальных режимов работы. Для построения модели поведения используется обучающая последовательность, большинство точек из которой полагаются нормальными, за исключением некоторого числа точек, называемых выбросами (в случае одноклассового метода опорных векторов 1-SVM).

Характерная черта метода 1-SVM состоит в применении специальной функции, называемой ядром, для преобразования обучающей последовательности данных из исходного пространства в более многомерное или, возможно, бесконечномерное пространство признаков и построения линейной модели (разделяющей гиперплоскости) в этом пространстве признаков, что позволяет практически всем нормальным данным находиться с одной стороны гиперплоскости и быть отделенными от аномальных данных, если такие имеются. Метод 1-SVM чувствителен как к выбору ядра, используемого при построении классификатора в случае, если ядро каким-то образом уже известно, так и к выбору параметров функции ядра, если функция задана с точностью до параметра. Выбор ядра зависит от входных данных и знания доли выбросов

в обучающей последовательности. В работе рассмотрены аспекты выбора ядра, исследуются три конкретные процедуры по выбору параметров. Процедуры были верифицированы на тестовых данных, традиционно используемых для оценки качества классификации, а также на отрезке реальных данных, полученных с объекта испытаний. Алгоритм метода опорных векторов реализован с использованием библиотеки [5], которая уже ранее применялась для решения аналогичной задачи диагностики сложных экспериментальных объектов [6, 7].

1. ОДНОКЛАССОВЫЙ МЕТОД ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

Пусть обучающая последовательность имеет вид: $\{(x_1, y_1), (x_p, y_p), \dots, (x_l, y_l)\}$, где векторы $x_i \in R^n$ и y_i — метка, которая принимает значение 1 или -1 в зависимости от того, принадлежит или нет точка классу.

Основная задача заключается в построении классификатора $F: R^n \rightarrow R$, сопоставляющего класс y произвольному вектору x (задача таксономии).

Решение задачи сводится к оптимизации функционала [8]:

$$\min_{\omega, \xi, \rho} \left(\frac{1}{2} \omega^T \omega - \rho + C \sum_{i=1}^l \xi_i \right) \quad (1)$$

при условии $\omega^T \phi(x_i) \geq \rho - \xi_i$, где ω — обобщенный портрет, $\xi_i \geq 0$ веса, характеризующие значение ошибки для $\{x_1, \dots, x_p, \dots, x_l\}$, l — число точек в обучающей последовательности, C — константа регуляризации, обычно $C = 1/vl$, где v — максимальная доля точек в обучающей последовательности, которые могут быть выбросами [9], $\phi(x_i): R^n \rightarrow R^m$ — функция отображения вектора x_i в расширенное пространство R^m , где обеспечивается линейная разделимость классов, ρ — параметр метода. На рис. 1 приведена графическая иллюстрация метода. Светлыми точками показаны векторы в обучающей последовательности, не использованные при построении разделяющей плоскости; темные точки означают опорные векторы; звездочками обозначены векторы в обучающей последовательности, которые классифицировались как выбросы, не принадлежащие классу. Величина $\rho/\|\omega\|$ определяет расстояние по нормали $\omega/\|\omega\|$ от точки начала отсчета O , которая для метода 1-SVM является единственной точкой изначально не принадлежащей классу, до разделительной гиперплоскости Θ .

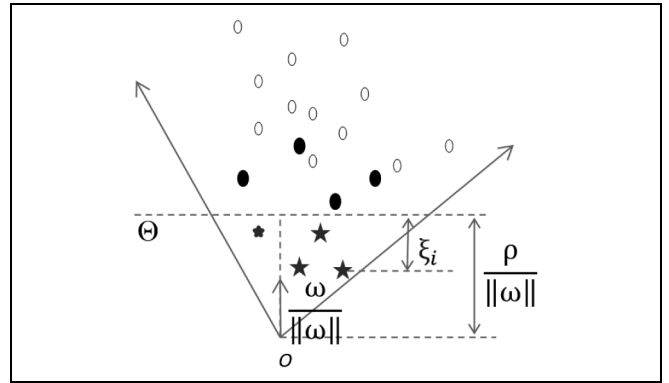


Рис. 1. Геометрическая иллюстрация метода 1-SVM

Соответствующая задаче (1) двойственная задача оптимизации имеет вид:

$$\min_{\alpha} \left(\frac{1}{2} \alpha Q \alpha^T \right), \quad (2)$$

где Q — положительно определенная центросимметричная матрица ядра с элементами $Q_{i,j} = K(x_i, x_j) = \phi(x_i)^T \phi(x_j)$, α_i — множители Лагранжа,

$K(x_i, x_j)$ — ядро, при условии $\sum_{i=1}^l \alpha_i = 1$, и $0 < \alpha_i \leq \frac{1}{vl}$.

Методу 1-SVM соответствует решающее правило:

$$t(x^*, \alpha) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^l \alpha_i K(x^*, x_i) - \rho \right).$$

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА ЯДРА И ЕГО ПАРАМЕТРА

От выбора ядра $K(x_i, x_j)$ существенно зависит результат классификации. Существует множество процедур выбора ядра, все они основаны на некоторых эмпирических предпосылках, что приводит к субъективному характеру получаемых результатов, следовательно, имеется трудность в выборе ядра для метода 1-SVM. Нами поставлены задачи отбора и валидации методов выбора ядра.

В работе [10] введено понятие выравнивания ядра как меры сходства между двумя ядрами или между ядром и целевой функцией, которая может быть использована для выбора ядра.

Выравнивание между ядрами K_1 и K_2 определяется как косинус угла между центросимметричными матрицами ядра Q_1 и Q_2 :

$$A(K_1, K_2) := \frac{\langle Q_1, Q_2 \rangle}{\|Q_1\|_F \|Q_2\|_F}, \quad (3)$$

где $\langle Q_1, Q_2 \rangle_F := \sum_{i,j=1}^l K_1(x_i, x_j) K_2(x_i, x_j)$ и $\|Q\|_F := \langle Q, Q \rangle_F^{1/2}$ скалярное произведение и норма Фробениуса соответственно. Выравнивание (3) может быть использовано как для сравнения ядер, так и для выбора оптимальных параметров для заданного ядра [11].

Обычно в качестве матрицы Q_2 используется идеальная матрица ядра $Q_2 = yy^T$, где вектор меток $\{y_i\}_{i=1}^l$ имеет значение из множества $Y = \{-1, 1\}$. Тогда выравнивание измеряет степень пригодности ядра для классификации образцов $\{x_i, y_i\}_{i=1}^l$. Фактически при выборе ядра стремятся обеспечить условие $K(x_i, x_j)|_{y_i=y_j} > K(x_i, x_j)|_{y_i \neq y_j}$. Однако данная процедура мало пригодна для метода 1-SVM, где в наличии имеется только обучающая последовательность, принадлежащая одному классу. Несколько облегчает ситуацию то, что в большинстве случаев [5] можно ограничиться в качестве ядра радиальной базисной функцией Гаусса (RBF)

$$K(x_i, x_j) = e^{-\gamma \|x_i - x_j\|^2}, \quad (4)$$

где γ — параметр ядра. Функция (4) широко применяется для классификации методом опорных векторов и имеет ряд преимуществ [12], но даже если зафиксировать вид функции, тогда остается проблема выбора параметра ядра γ . В работе [13] отмечено, что большие значения γ приводят к переобучению, т. е. классификатор теряет способность распознавать образцы за пределами обучающей последовательности. Малые значения γ препятствуют способности классификатора обнаруживать образцы, не принадлежащие классу, так как ядро постепенно сводится к постоянной функции. В работе [14] показано, что если параметр γ велик и $K(i, j) \rightarrow 0, i \neq j$, то оптимальным решением α в задаче оптимизации (2) служит $\alpha_i = 1/l$, и значение целевой функции будет равно $1/l$. Если же γ слишком мало и $K(i, j) \rightarrow 1$, то оптимальное решение для задачи (2) принадлежит всему допустимому множеству для α , а значение целевой функции будет стремиться к единице. Выбор γ существенно влияет на положение решения в границах $[1/l, 1]$.

3. МЕТОДЫ ВЫБОРА ПАРАМЕТРА ЯДРА

Первым из рассмотренных методов выбора параметра γ для ядра был метод перекрестной проверки. Для выбора значения параметра γ может

быть применена оптимизационная процедура перекрестной проверки [15], когда исходная обучающая последовательность разбивается на несколько выборок меньшего размера, которые используются для обучения и контрольной классификации. Оптимизация проводится для фиксированного набора значений γ и выбирается наименьшее γ такое, что назначенная доля v точек классифицируется как выбросы.

Данная процедура была успешно применена, однако она, очевидно, чувствительна к параметру v . Доля выбросов параметра v не всегда может быть оценена, исходя из условий эксперимента, в частности, это затруднительно для данных, представляющих собой параметры, меняющиеся во времени, когда каждый вектор x_i является временным срезом диагностируемого процесса.

Далее был рассмотрен метод максимума дисперсии. Для случая, когда ядро задано в виде RBF и значение v не известно, в работе [14] предложена другая процедура выбора параметра γ . В качестве индикатора оптимальности выбора параметра γ служит значение выборочной дисперсии s^2 недиагональных элементов ядра $K(i, j)|_{i \neq j}$ для матрицы Q , нормированной на среднее значение $\bar{Q}$. Оптимальным считается ядро, при котором достигается $\max_{\gamma} s^2 / \bar{Q}$. Этот подход использует преимущество поведения метода 1-SVM с ядром в виде RBF.

Было показано, что для ядер с большей выборочной дисперсией получаются лучшие результаты по классификации. Можно предположить, что результаты являются следствием того, что вектору α с большим числом нулевых элементов (более разреженному), который отвечает матрице ядра Q с большей выборочной дисперсией, соответствует меньшее число точек обучающей последовательности, отобранных в качестве опорных векторов, что, как следствие, улучшает качество классификации.

Наконец, был рассмотрен метод максимума энтропии. В дополнение к процедуре [14] предложена эвристическая процедура, основанная на сходных предпосылках о необходимости обеспечения разреженности вектора α . В качестве меры рассеяния матрицы ядра Q используется энтропия функции ядра $H = -\sum p_i \log_2 p_i$ [16], и решается задача оптимизации:

$$\max_{\gamma} E. \quad (5)$$

Решение задачи (5) для γ существует и единственно, так как Q — положительно определенная матрица и E — выпуклая функция.



4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 2 и 3 для трех процедур: 1 — перекрестной проверки, 2 — максимума дисперсии и 3 — максимума энтропии. Расчеты проводились с использованием библиотеки опорных векторов [5]. В табл. 1 приведены данные по тестовым примерам, использованным при моделировании. Данные тесты часто применяются для сравнения классификаторов.

Моделирование проводилось для двух случаев: первый — когда доля выбросов ν в обучающей последовательности известна; второй — когда доля выбросов не известна и задается произвольно, часто ее значение

$$\nu = 1/n \quad (6)$$

устанавливается по умолчанию [5].

Качество классификации для сравнения процедур рассчитывалось по формулам:

$$acc = \frac{a + d}{a + b + c + d} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

$$g = \sqrt{\frac{ad}{(a+b)(c+d)}} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где a , b , c и d — элементы матрицы ошибок (табл. 2).

Таблица 1

Параметры тестовых примеров

Номер примера	Источник	Объем данных	Размерность вектора данных (n)
1	[17]	580	2
2	[18]	862	2

Таблица 2

Элементы матрицы ошибок

Действительное значение	Результат классификации	
	Образец не принадлежит классу	Образец принадлежит классу
Образец не принадлежит классу	a	b
Образец принадлежит классу	c	d

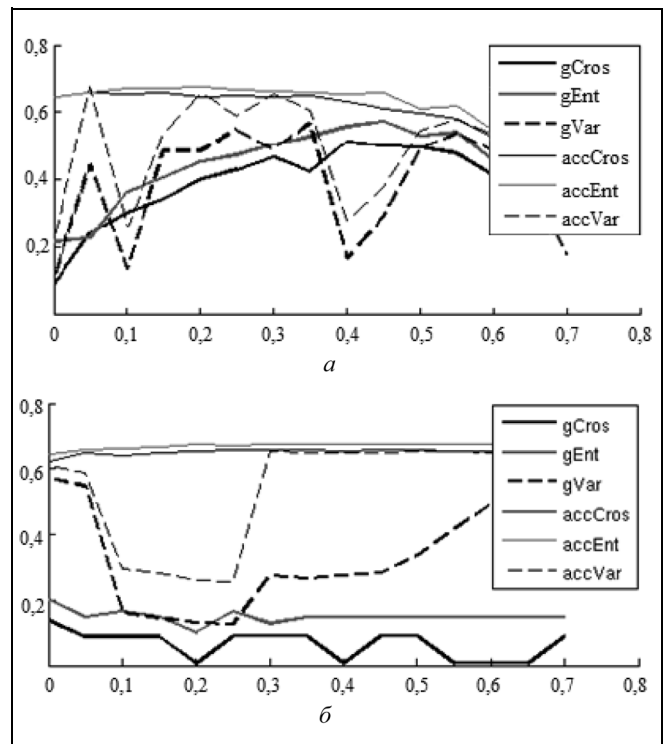


Рис. 2. Зависимость качества классификации от доли выбросов в обучающей последовательности. Пример 1: a — при известном ν ; b — при фиксированном $\nu = 1/n$

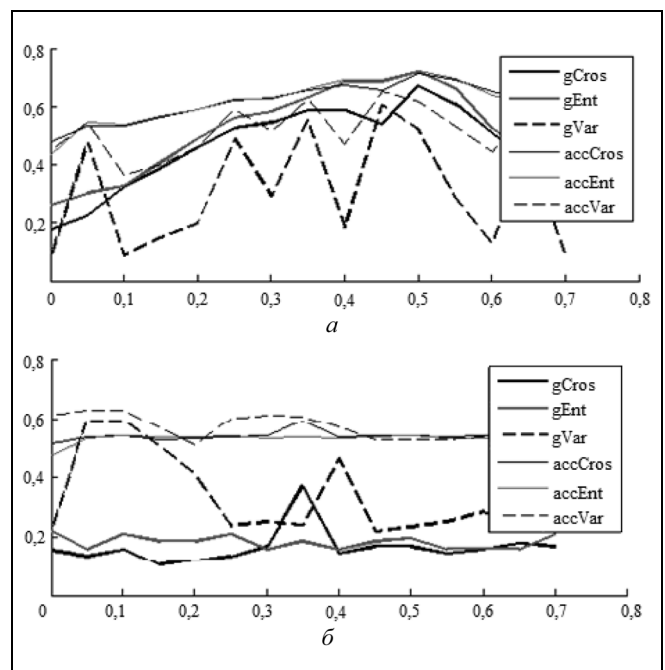


Рис. 3. Зависимость качества классификации от доли выбросов в обучающей последовательности: a — при известном ν (пример 2); b — при фиксированном $\nu = 1/n$ (пример 1)

Формула (7) традиционно применяется для расчета качества классификации, но ее недостаток в том, что при существенном дисбалансе числа принадлежащих и не принадлежащих классу образцов (выбросов) результат расчета по ней имеет тенденцию сдвигать оценку качества классификации в сторону классификатора, наиболее точно классифицирующего наибольшую часть массива тестовых векторов. Для тестовых примеров со значительным дисбалансом лучше использовать для оценки качества классификации формулу геометрического среднего (8) [19]. В тестовых примерах доля принадлежащих и не принадлежащих классу образцов варьировалась в широких пределах (0,01—0,8), поэтому нами приведено сравнение качества классификации по двум формулам.

На рис. 2 и 3 приведена зависимость качества классификации для примеров (табл. 1 примеры 1 и 2 соответственно). Для рис. 2, а и 3, а доля выбросов v в обучающей последовательности считалась известной, для рис. 2, б и 3, б параметр v считался неизвестным и задавался по формуле (6). Обозначения кривых на рис. 2 и 3 приведены в табл. 3.

Проведенное тестирование позволяет сделать только качественные выводы по оценке классификации, что закономерно, если учитывать разнообразие тестовых примеров. Выводы сохраняют свое значение для большинства примеров, с которыми мы работали, но не представленные в статье.

Когда доля выбросов v в обучающей последовательности известна (см. рис. 2, а и 3, а), процедуры 1 и 3 обеспечивали сравнимое качество классификации по формуле (7) (в среднем более 60 %), и в процедуре 3 достигалась несколько лучшая оценка по формуле (8). В тестовых примерах, как для случая известного v (см. рис. 2, а и 3, а), так и для случая фиксированного v (см. рис. 2, б и 3, б)

наблюдалось спорадически проявляющееся резкое изменение качества классификации при незначительном изменении числа выбросов в обучающей последовательности, это характерно для процедуры 2 и в меньшей степени для процедуры 1.

Для фиксированного v (см. рис. 2, б и 3, б), очевидно ухудшение качества классификации для всех процедур оценки, особенно это заметно для оценки по формуле (8) из-за неточного выбора константы регуляризации C для процедур 1—3 и дополнительно параметра γ для процедуры 1. Процедура 3, на наш взгляд здесь более предпочтительна из-за относительной стабильности качества классификации при изменении тестовой последовательности, при несколько лучшем в среднем качестве классификации по сравнению с процедурой 1. Процедура 2 показывает значительный разброс точности классификации. Оценка γ процедуры 2 имела тенденцию к переобучению (большие значения параметра γ), процедура 3 наоборот, обеспечивала меньшее значение параметра γ .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод опорных векторов показал свою практическую пригодность для оценки состояния объекта и обнаружения изменения характера процесса. Однако он чувствителен как к выбору ядра, так и к выбору его параметров. Во многих практических случаях можно использовать в качестве ядра радиальную базисную функцию Гаусса, однако остается проблема выбора параметров ядра.

Нами исследовались три процедуры оценки параметра, две процедуры известные по литературе: перекрестной проверки; максимума дисперсии и также предложенная нами модификация последней процедуры, когда минимизировался функционал энтропии матрицы ядра.

Проведены эксперименты как на модельных данных, так и данных реальных объектов (использовались записи параметров авиационных двигателей), которые укладываются в следующую картину. Качество классификации зависит от возможности оценить значение доли выбросов в обучающей последовательности и, если это возможно, то все процедуры обеспечивали хорошее качество классификации. Однако для процедуры 2 и в меньшей степени для процедуры 1 характерно резкое изменение качества классификации при незначительном изменении входных параметров, процедура 3 в этом свете предпочтительнее благодаря стабильности качества классификации при изменении доли выбросов в обучающей последовательности.

Таблица 3

Обозначения на рис. 2 и 3

Обозначение	Формула для расчета	Процедура
gCros	(8)	1
gVar		2
gEnt		3
accCrosVar	(7)	1
accVar		2
accEnt		3



Если нет возможности оценить долю выбросов в обучающей последовательности, то при сохранении общих соотношений для исследуемых процедур качество классификации ухудшается, особенно это заметно для оценки качества, рассчитанного как геометрическое среднее и отражающее баланс ошибок в классификации как выбросов, так и данных принадлежащих классу.

Оценка по максимуму дисперсии имела тенденцию к переобучению, процедура оценки по максимуму энтропии, наоборот, обеспечивала меньшее значение параметра ядра RBF и была более близкой по качеству классификации к процедуре перекрестной проверки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов. — М.: Наука, 1974.
2. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly Detection: A Survey // ACM Computing Surveys. — 2009. — Vol. 41, iss. 3.
3. Markou M., Singh S. Novelty Detection: A Review. Part 1: Statistical Approaches // Signal Processing. — 2003. — Vol. 83. — P. 2481—2497. doi: 10.1016/j.sigpro.2003.07.018.
4. Markou M., Singh S. Novelty Detection: A Review. Part 2: Neural Network Based Approaches // Signal Processing. — 2003. — Vol. 83. — P. 2499—2521.
5. Chang C., Lin C. LIBSVM: a Library for Support Vector Machines. — URL: <https://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/> (дата обращения 26.10.2015).
6. Iverson D., Martin R., Schwabacher M., et al. General Purpose Data-Driven System Monitoring for Space Operations // AIAA Infotech@Aerospace Conference, AIAA, Washington, DC, 2009, AIAA paper 2009-1909.
7. Schwabacher Mark, Oza Nikunj, Matthews Bryan. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication. — July 2009. — Vol. 6. Unsupervised Anomaly Detection for Liquid-Fueled Rocket Propulsion Health Monitoring.
8. Scholkopf B., Smola A.J. Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond. — Cambridge: MIT Press, 2002.
9. Scholkopf B., Smola A., Williamson R.C., Bartlett P.L. New support vector algorithms. — URL: <http://www.stat.purdue.edu/~yuzhu/stat598m3/Papers/NewSVM.pdf> (дата обращения 02.09.2015).
10. Cristianini N., Shawe-Taylor J., Elissee A., Kandola J. On kernel-target alignment / In Dietterich, T.G., Becker, S., and Ghahramani, Z., eds, Advances in Neural Information Processing Systems 14. MIT Press, 2002.
11. Gert R.G., Lanckriet Nello Cristianini, Peter Bartlett, et. al. // Journal of Machine Learning Research — 2004. — Vol. 5. — P. 27—72.
12. Lin H.-T., Lin. C.-J. A study on sigmoid kernels for SVM and the training of non-PSD kernels by SMO-type methods // Technical report, Department of Computer Science, National Taiwan University, 2003.
13. Shawe T.J., Nello C.N. Kernel Methods for Pattern Analysis // Cambridge University Press, 2004.
14. Evangelista P.F., Embrechts M.J., Szymanski B.K. Proceedings International conference on Artificial Neural Networks ICANN07 / Portugal /, lecture notes in Computer Sciences — September 2007. — Springer, Germany. — Vol. 466. — Part 1. — P. 269—278.
15. Runarsson R.T., Unnthorsson R., Johnson T.M. Model Selection in One Class Nu-SVMs using RBF Kernels // 16th Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, 2003.
16. Smylie D., Clarke G., Ulrych T. Analysis of irregularities in the Earth's rotation. Methods in Computational Physics. R. Alder, et. al. Academic Press Inc., N.-Y., 1973. — Vol. 13. — P. 391—430.
17. Chessboard. — URL: <http://pages.cs.wisc.edu/~olvi/data/check1.txt> (дата обращения 26.10.2015).
18. URL: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvmtools/datasets/binary.html#fourclass> (дата обращения 23.10.2015).
19. Kubat M., Holte R., Matwin S. Learning when Negative Example Abound // Proc. of the 9-th European Conference on Machine Learning, ECML 97, Prague, 1997.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Михальским.

Будынкков Алексей Николаевич — инженер-программист,
✉ alexey.budynkov@gmail.com,

Масолкин Станислав Ильич — научный сотрудник,
✉ masolkin@gmail.com,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

Не забудьте подписаться!

Подписку на журнал «Проблемы управления» можно оформить в любом почтовом отделении (подписной индекс 81708 в каталоге Роспечати или 38006 в объединенном каталоге «Пресса России»), а также через редакцию с любого месяца, при этом почтовые расходы редакция берет на себя. Отдельные номера редакция высылает по первому требованию.

ОРГАНИЗАЦИЯ КОНВЕЙЕРНОЙ ПРОГРАММНОЙ ОБРАБОТКИ В МУЛЬТИСЕРВЕРНОЙ СЕТЕВОЙ СРЕДЕ

Р.Э. Асратян

Рассмотрены принципы организации Интернет-службы, ориентированной на поддержку распределенных приложений и систем и представляющую собой своего рода «сетевое обобщение» известного механизма программного конвейера, позволяющее распространить его применение на мультисерверную среду. Отмечено, что характерная особенность новой службы заключается в возможности одновременного запуска нескольких удаленных исполняемых модулей на различных сетевых узлах с обеспечением каналов обмена данными между ними.

Ключевые слова: распределенные системы, Интернет-технологии, информационное взаимодействие, конвейерная обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Механизм программного «трубопровода» или «конвейера» (pipeline), впервые реализованный в системе UNIX, остается одним из основных средств соединения возможностей нескольких программ для решения общей задачи [1, 2] во всех основных платформах. В большинстве командных процессоров этот механизм представляется в форме составной командной строки вида

$$\text{Cmd}_1 \mid \text{Cmd}_2 \mid \dots \mid \text{Cmd}_n,$$

в которой каждый компонент Cmd_i представляет собой команду вызова какого-то локального модуля-обработчика. Предполагается, что стандартный вывод Cmd_i соединяется со стандартным вводом Cmd_{i+1} ($i = 1, 2, \dots, n - 1$). На поведение каждого обработчика накладывается единственное ограничение: он должен читать входные данные со стандартного ввода, писать выходные данные в стандартный вывод и заканчивать свою работу после закрытия стандартного ввода.

Главный недостаток механизма трубопровода заключается в его локальности: все модули-обработчики должны выполняться на одном компьютере. Это ограничение не позволяет использовать его для организации распределенной обработки [3] в мультисерверной сетевой среде (в частности, в распределенных управляющих системах).

В настоящей работе рассматривается «сетевое обобщение» механизма трубопровода, предназначенное именно для этой цели и позволяющее за-

давать последовательность модулей-обработчиков в форме

$$\text{Имя_сервера}_1 @ \text{Cmd}_1, \text{Имя_сервера}_2 @ \text{Cmd}_2, \dots, \\ \text{Имя_сервера}_n @ \text{Cmd}_n,$$

в которой каждый компонент последовательности содержит не только команду запуска модуля-обработчика, но и сетевое имя сервера, на котором он должен быть запущен. Более того, каждая команда тоже может представлять собой заключенную в скобки «вложенную» последовательность команд, также содержащую имена серверов и модулей для описания последовательного межсерверного взаимодействия. Другими словами, предлагаемый подход позволяет организовать выполнение произвольного множества программ-обработчиков в произвольной цепочке серверов с организацией взаимодействия через стандартные входы-выходы одним простым вызовом из программы-клиента. В частности, он допускает использование разработанных в течение десятилетий хорошо известных программ (таких, например, как `grep`, `sed`, `md5sum`, `sort` и многих других) в сетевой мультисерверной мультиплатформенной среде без какой-либо адаптации. Наиболее известные сетевые технологии, в том числе завоевавшие высокую популярность у разработчиков в последние годы, WCF [4], WebSocket [5] или системы организации распределенных кластерных вычислений типа Nadoop [6] не предоставляют готового решения этой задачи.

Известно, что такое решение, в принципе, может быть получено путем использования службы сетевого командного интерпретатора SSH [7] в



обычном программном конвейере для создания сетевых каналов взаимодействия. Однако, как показывает практика, на организацию взаимодействия в цепочке из 2—3 серверов при этом подходе может потребоваться несколько секунд. Такая задержка чаще всего является вполне комфортной при работе «с клавиатуры», но может значительно затруднить применение этого решения для организации взаимодействия между программными компонентами в распределенных системах.

В отличие от традиционного механизма трубопровода, опирающегося на локальный механизм «неименованного канала» pipe [1, 2], описываемый подход опирается на специальную сетевую службу, позволяющую организовать сетевой обмен между стандартными выходами и стандартными входами программ, выполняющихся на разных серверах с достаточно высокой скоростью (сетевые задержки обычно измеряются долями секунд, но не секундами, как в упомянутом решении). Важное свойство службы заключается в наличии удобного программного интерфейса, позволяющего легко организовать межсерверную конвейерную обработку из любой программы (в том числе, из программных компонентов распределенных систем) без использования командного процессора.

1. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ МУЛЬТИСЕРВЕРНОГО КОНВЕЙЕРА

Интернет-служба RECS (Remote Executables Call Service) — служба удаленного вызова исполняемых модулей [8] основана на той же идее межпроцессного взаимодействия через стандартные входы и выходы, что и общепринятый одномашинный программный конвейер, но со следующими важными отличиями.

- RECS является сетевой службой. Для организации трубопровода программа-клиент обращается к обслуживающему ее RECS-серверу и передает ему составную командную строку вида **Command₁, Command₂, ..., Command_n** для исполнения.
- Каждый компонент **Command_i** представляет собой или просто команду запуска исполняемого модуля на обслуживающем сервере или конструкцию, называемую «вложенной командной строкой». Эта конструкция имеет вид «имя_сервера@команда» или даже «имя_сервера@(команда₁, команда₂, ..., команда_n)» и предполагает запуск одного или нескольких исполняемых модулей на удаленном сервере с заданным Интернет-именем. При этом каждая «команда» может, в свою очередь, представлять собой такую же конструкцию с именем другого сервера и списком команд и т. д.

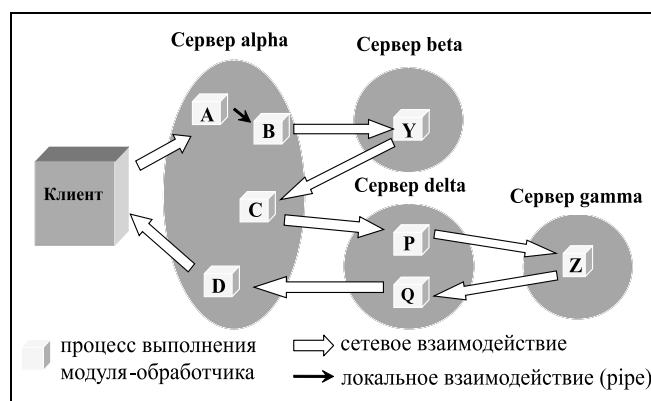


Рис. 1. Пример структуры конвейерных соединений

Другими словами, RECS позволяет программе-клиенту осуществить одновременный вызов сразу нескольких исполняемых модулей (обработчиков), расположенных на разных сетевых узлах. В момент вызова непосредственно обслуживающий клиента RECS-сервер организует запуск указанных обработчиков на собственном сетевом узле и/или на удаленных узлах (разумеется, также оснащенных RECS-серверами). В тот же момент усилиями всех задействованных серверов создается множество «каналов», попарно соединяющих запущенные обработчики по принципу «стандартный вывод предыдущего со стандартным вводом следующего». Конечно же, стандартный ввод первого обработчика и стандартный вывод последнего соединяются с клиентом. С этого момента все отправленные клиентом данные будут проходить последовательную обработку во всех запущенных исполняемых модулях, а результирующие данные будут немедленно направляться клиенту по мере их появления. На содержание данных (текстовые или двоичные) и последовательность их отправки и приема не накладывается никаких ограничений (хотя, разумеется, поведение клиентов должно быть логически согласовано с поведением обработчиков). На рис. 1 проиллюстрирована структура информационных связей в мультисерверной среде при обработке командной строки

A, B, beta@Y, C, delta@(P, gamma@Z, Q), D.

Предполагается, что сервер alpha является обслуживающим клиента сервером, а прописные латинские буквы являются именами исполняемых модулей. Важно отметить, что в данном примере серверы beta и/или gamma могли бы быть недоступны непосредственно для клиента. Например, клиент мог бы быть расположен в частной сети организации, а указанные серверы — вне нее. В этом случае серверу alpha фактически выпала бы роль сервера-посредника, расположенного на границе двух сетей.

Понятие обобщенного «конвейерного соединения», связывающего обработчиков друг с другом (а также крайних обработчиков с клиентом) является основополагающим для RECS. Хотя для его организации в разных ситуациях используются разные технологии — «трубопровод» (pipe), если соединяемые обработчики находятся на одном узле, и межсерверное сетевое взаимодействие, если на разных — у пользователя создается иллюзия единого связующего механизма, достаточно ясно-го и простого в обращении.

2. КОРОТКИЙ ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ RECS

Как и всякая сетевая служба, основанная на протоколах TCP/IP [9], RECS поддержана клиентским и серверным программным обеспечением (ПО). Сервер RECS представляет собой постоянно активную программу, обслуживающую запросы на обработку от клиентов или других серверов. Клиентское ПО представляет собой библиотеку функций, реализующих прикладной программный интерфейс (API) к RECS. Этот интерфейс служит «лицом» RECS с точки зрения пользователя.

Рассмотрим короткий пример кода на языке C++, в котором клиентская программа обращается к обслуживающему серверу на платформе win32 для вычисления контрольной суммы всех исполняемых файлов (файлов типа «exe») в каталогах C:\WINDOWS\system32 и C:\WINDOWS\system на этом сервере (например, с целью проверки, изменились ли эти файлы в каталогах или нет). Предположим, что на этом сервере имеется обработчик dirlist.exe, который получает на стандартный ввод имя каталога и записывает в стандартный вывод построчный список имен всех содержащихся в нем файлов и их контрольных сумм, причем контрольная сумма каждого файла и его имя выводятся в отдельной строке. Для вычисления общей контрольной суммы только исполняемых файлов программа привлекает еще один сервер (с именем unode) на платформе UNIX или Linux, чтобы использовать уже имеющиеся в нем широко известные программы-обработчики grep и sort, обеспечивающие фильтрацию и сортировку полученного списка соответственно. Формирование окончательной 32-байтовой контрольной суммы от этого списка (с отправкой результата в стандартный вывод) реализуется с помощью известной программы md5sum.exe снова на обслуживающем сервере (разумеется, мы предполагаем, что оба сервера оснащены серверным ПО RECS):

```
char Checksum [32];  
RECSclnt Rcln;  
Rcln.Config("alpha", 8130,"alibaba","sezam");  
Rcln.Connect();
```

```
Rcln.Process("dirlist.exe, unode$(grep.exe$,sort),  
md5sum.exe");  
Rcln<<"c:\\windows\\system";  
Rcln.GetLine(Checksum, 32);  
cout<<Checksum<<"\n"<<Rcln.GetSysMsg()<<"\n";  
Rcln<<"c:\\windows\\system32";  
Rcln.GetLine(Checksum, 32);  
cout<<Checksum<<"\n"<<Rcln.GetSysMsg()<<"\n";  
Rcln.Quit(); Rcln.Disconnect();
```

Первые две строки определяют две переменные: строковую переменную и объект класса RECSclnt. Этот класс содержит в себе все методы, необходимые клиенту для работы с RECS. Третья строка (метод Config) настраивает объект на работу с определенным RECS-сервером. В качестве параметров объекту передаются IP-адрес (или Интернет-имя) сервера, номер порта, имя и пароль пользователя (RECS-сервер обслуживает только зарегистрированных пользователей).

Четвертая строка устанавливает TCP-соединение с сервером, а пятая запускает три удаленных обработчика (с помощью метода Process). Первый из них (dirlist.exe) запускается непосредственно на обслуживающем сервере (alpha), два следующих (grep и sort) — на сервере unode, а последний (md5sum) — снова на сервере alpha. Сразу после запуска все серверы переходят к ожиданию появления данных на их стандартных вводах.

Шестая, седьмая и восьмая строки обеспечивают передачу на сервер имени первого каталога, считывание результата обработки (метод GetLine) и вывод на экран полученной контрольной суммы вместе с итоговым диагностическим сообщением сервера.

Три последующие строки повторяют операцию вычисления контрольной суммы для второго каталога.

Предпоследняя строка извещает сервер о завершении диалога (он мог бы продолжаться неограниченно), а последняя прекращает сетевое соединение. Метод Quit вызывает последовательное закрытие стандартного ввода во всех обработчиках и завершение их работы.

Разумеется, из данного фрагмента кода намеренно удалены операторы проверки успеха выполнения методов и обработки исключений.

3. СОЗДАНИЕ КОНВЕЙЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Как видно из приведенного примера, сеанс связи в RECS включает в себя три основные фазы:

- соединение с обслуживающим сервером и передача ему командной строки, включающей в себя имена серверов и модулей-обработчиков (метод Process);
- отправку данных для обработки на удаленных серверах и получение результатов обработки;
- завершение сеанса связи.



Первая фаза наиболее сложная. Она включает последовательный запуск модулей-обработчиков не только в обслуживаемом сервере, но и на всех серверах, поименованных в командной строке, вместе с созданием специальных каналов обмена данными между ними — конвейерных соединений.

Обработка метода Process выполняется «рекурсивно»: каждый вовлеченный в обработку сервер получает относящийся к нему фрагмент командной строки от другого сервера с помощью точно такого же метода Process. В зависимости от того, на одном ли сервере выполняются взаимодействующие модули-обработчики или на разных, для организации связи между ними применяются различные типы конвейерных соединений (см. таблицу). Если первый из типов представляет собой обычный локальный канал pipe, соединяющий два вычислительных процесса, то все последующие включают в себя по два канала (входной и выходной), в число которых обязательно входят TCP-каналы, ассоциированные с открытыми сетевыми соединениями. Важным компонентом этих типов конвейерных соединений является транспортная программная нить (ТН), обеспечивающая постоянный перенос данных из входного канала в выходной (по мере их появления) и закрытие выходного канала после закрытия входного. При запуске ТН получает в качестве аргументов два системных

дескриптора. Каждый из них может представлять собой дескриптор чтения или записи канала pipe или же дескриптор сетевого сокета [9] (но с учетом того, что перенос данных из одного канала pipe в другой — бессмысленная операция). Описываемый подход опирается на определенное сходство между двумя типами каналов: несмотря на совершенно разную физическую природу, оба представляют собой буферизованные байтовые каналы обмена, функционирующие по принципу FIFO (first in first out). Вместе с тем, он учитывает и принципиальное различие между ними: в отличие от дескрипторов канала pipe, дескриптор сетевого сокета не может быть непосредственно связан со стандартным вводом или выводом процесса.

Обработка метода Process в сервере RECS включает в себя прием командной строки по TCP-соединению с клиентом и последовательной обработки всех ее компонентов по приведенному ниже алгоритму. Предполагается, что AccessSocket — индекс сокета для соединения с клиентом (т. е. сокета, полученного с помощью системного вызова accept), переменная RemoteSocket используется для хранения индекса последнего сокета, открытого для связи с удаленным сервером, а переменная ReadPipe — для хранения дескриптора чтения последнего созданного канала pipe.

Типы конвейерных соединений

Тип конвейерного соединения	Принцип организации	Пояснение
Pipe		Общепринятый трубопровод для локального взаимодействия на одном сервере. Один из процессов использует pipe в качестве стандартного вывода, а другой — в качестве источника для стандартного ввода
Pipe-Socket		Отправка данных со стандартного вывода процесса в сеть (для передачи на стандартный ввод удаленного процесса). Транспортная программная нить ТН обеспечивает непрерывное чтение данных из выходного дескриптора pipe-а и запись их в сетевой сокет, соединенный с удаленным сервером
Socket-Pipe		Прием данных из сети для передачи на стандартный ввод процесса. Транспортная программная нить ТН обеспечивает непрерывное чтение данных из сокета, соединенного с удаленным сервером и запись их во входной дескриптор pipe-а, соединенного со стандартным вводом процесса-получателя
Socket-Socket		Транзитная передача данных через сервер. Транспортная программная нить ТН обеспечивает непрерывное чтение данных из сокета, соединенного с одним удаленным сервером и запись их в сокет, соединенный с другим

Шаг 1. Если очередной компонент представляет собой вложенную командную строку (т. е. обращением к удаленному серверу), то перейти к шагу 2, в противном случае — к шагу 3.

Шаг 2. Выделение имени удаленного сервера RECS из вложенной командной строки. Создание нового сокета для связи с удаленным сервером и установление сетевого соединения с ним. В случае невозможности соединения перейти к шагу 5. Передача удаленному серверу RECS вложенной командной строки по данному соединению (для этого фактически применяется тот же самый клиентский метод Process). Получение сообщения о завершении обработки вложенной командной строки от удаленного сервера. Если от удаленного сервера получено сообщение об ошибке, перейти к шагу 5. Создание конвейерного соединения по правилам:

- если компонент первый в командной строке, то создание соединения типа «Socket-Socket» с использованием дескриптора AccessSocket и дескриптора нового сокета;
- если предыдущий компонент в командной строке является вложенной командной строкой, то создание соединения типа «Socket-Socket» с использованием дескриптора RemoteSocket и дескриптора нового сокета;
- если предыдущий компонент в командной строке не является вложенной командной строкой, то создание соединения типа «Pipe-Socket» с использованием дескриптора ReadPipe и дескриптора нового сокета.

Занесение дескриптора нового сокета в переменную RemoteSocket и переход к шагу 4.

Шаг 3. Запуск процесса выполнения модуля-обработчика, соответствующего очередному компоненту. В случае невозможности запуска модуля перейти к шагу 5. Создание конвейерного соединения по правилам:

- если компонент первый в командной строке, то создание неименованного канала pipe (с соединением его дескриптора чтения со стандартным вводом запущенного процесса) и создание соединения типа «Socket-Pipe» с использованием дескриптора AccessSocket и дескриптора записи этого канала pipe;
- если предыдущий компонент в командной строке является вложенной командной строкой, то создание неименованного канала pipe (с соединением его дескриптора чтения со стандартным вводом запущенного процесса) и создание соединения типа «Socket-Pipe» с использованием дескриптора RemoteSocket и дескриптора записи этого канала pipe;
- если предыдущий компонент в командной строке не является вложенной командной строкой, то создание соединения типа «Pipe» путем

соединения дескриптора ReadPipe со стандартным вводом запущенного процесса (общепринятое соединение двух процессов через pipe).

Создание неименованного канала pipe с соединением его дескриптора записи со стандартным выводом запущенного процесса и занесением его дескриптора чтения в переменную ReadPipe.

Шаг 4. Если очередной компонент не последний в командной строке, то выбрать следующий компонент в качестве очередного компонента и вернуться к шагу 1. Если очередной компонент является вложенной командной строкой, то создание завершающего конвейерного соединения типа «Socket-Socket» с использованием дескриптора RemoteSocket и дескриптора AccessSocket. В противном случае — создание завершающего конвейерного соединения типа «Pipe-Socket» с использованием дескриптора ReadPipe и дескриптора AccessSocket. Запись сообщения об успешном завершении обработки метод Process («ОК») в сокет с дескриптором AccessSocket.

Шаг 5. Аварийное завершение обработки. Прекращение работы всех запущенных модулей-обработчиков, закрытие всех каналов pipe и сетевых соединений. Запись сообщения об ошибке в сокет с дескриптором AccessSocket.

Важно отметить, что обработка вложенной командной строки в удаленном сервере RECS (шаг 2 рассмотренного алгоритма) осуществляется в точности по этому же алгоритму с построением конвейерных соединений, в которых задействуются сокеты, обеспечивающие сетевую связь между серверами.

Рассмотрим в качестве примера структуру конвейерных соединений, созданную для выполнения командной строки **A, B, beta@C** в сервере alpha на основе описанного алгоритма (рис. 2). Процессы выполнения модулей-обработчиков обозначены «кубиками». Как видно из рисунка, даже в таком простом примере задействованы все четыре типа соединений.

Конвейерное соединение (1) обеспечивает передачу всех данных, полученных по сети от клиента, в канал pipe, соединенный со стандартным вводом модуля-обработчика «А». Это соединение использует сокет, открытый при установлении сетевого соединения с клиентом (дескриптор AccessSocket). Конвейерное соединение (2) представляет собой обычную связь между стандартным выводом обработчика «А» и стандартным вводом обработчика «В» через неименованный канал pipe. Конвейерные соединения (3) и (4) обеспечивают передачу данных от обработчика «В» на сервере alpha к обработчику «С» на сервере beta. Оба соединения используют сокеты, открытые для межсерверного взаимодействия на серверах alpha и

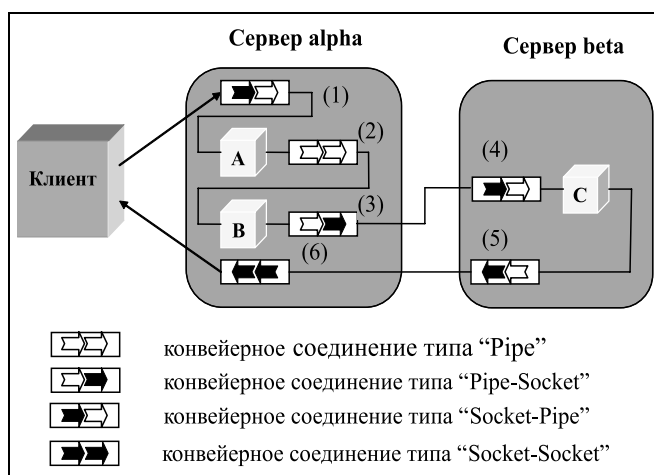


Рис. 2. Пример структуры конвейерных соединений *n*

beta соответственно. Наконец, соединения (5) и (6) обеспечивают возврат клиенту всех данных со стандартного вывода обработчика «С». Так как возврат данных непосредственно клиенту с сервера beta невозможен, в качестве посредника используется сервер alpha. Отметим, что конвейерные соединения (1) и (6) пользуются одним и тем же сокетом для чтения данных из сети и для записи данных в сеть соответственно. То же можно сказать и о соединениях (4) и (5), а также о соединениях (6) и (3).

Корректность обработки клиентских данных в последовательности обработчиков, запущенных в мультисерверной среде, целиком определяется точностью работы созданных конвейерных соединений. Если каждое конвейерное соединение, независимо от его типа, обеспечивает передачу всех байтов со своего входа на выход без потерь и нарушения очередности, то результат обработки будет таким же, как в случае запуска всех обработчиков на одном сервере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже отмечалось, описанный подход базируется на определенном сходстве между локальным каналом pipe и сетевым TCP-каналом между удаленными программами: оба типа каналов реализуют буферизованные потоки данных, оба поддерживаются удобными блокирующими функциями ввода-вывода (с автоматической приостановкой выполнения при отсутствии данных в операции чтения или при переполнении буферов в операции записи) и т. п. Служба RECS построена таким образом, чтобы фундаментальные различия в физической природе каналов оказались незаметны для пользователя.

Как видно из примера, приведенного в § 2, рассмотренная технология может быть применена в

гетерогенной серверной среде: в настоящее время сервер RECS реализован на платформах Windows и Unix/Linux.

К важным преимуществам описанного подхода относится удобство отладки сервисных программ-обработчиков: каждая такая программа допускает автономную отладку вне сетевой среды, основанную на подаче тестового потока байтов на стандартный ввод и анализе стандартного вывода (фактически, это преимущество целиком «унаследовано» у общепринятого одномашинного конвейера).

Отметим, что описанный подход базируется на создании отдельного процесса (задачи) для запуска каждой из программ-обработчиков. К сожалению, использование программных потоков (нитей) для той же цели оказывается невозможным, так как все программные потоки в пределах одной задачи разделяют одни и те же стандартный ввод и стандартный вывод (здесь имеется прямая аналогия с технологией CGI, испытывающей то же ограничение). Отсюда вытекает существенный недостаток описанного подхода — проигрыш в скорости обработки технологиям типа WS и WCF, имеющим возможность опираться на программные нити. Этот проигрыш связан с накладными расходами на управление процессами на серверах и проявляется тем в большей степени, чем короче время выполнения информационного запроса. Поэтому область эффективного применения описанного подхода включает в себя взаимодействия, связанные с достаточно большими объемами передаваемой информации и с достаточно длительной обработкой (например, поиск информации в СУБД, удаленное формирование отчетов и т. п.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Келли-Бутл С. Введение в Unix. — М.: ЛОРИ, 1995. — 596 с.
2. Таненбаум Э. Современные операционные системы. — СПб.: Питер, 2002. — 1040 с.
3. Гофф М. Сетевые распределенные вычисления: достижения и проблемы. — М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2005. — 320 с.
4. Мак-Дональд М., Шнушта М. Microsoft ASP.NET 3.5 с примерами на C# 2008 и Silverlight 2 для профессионалов. — М.: Вильямс, 2009. — 1408 с.
5. Wang V., Salim F., Moskovits P. The definitive guide to HTML5 WebSocket. — N.-Y.: Apress, 2013. — 208 p.
6. Yait T., Hadoop. Подробное руководство. — СПб.: Питер, 2013. — 672 с.
7. Хант К. TCP/IP. Сетевое администрирование. — СПб.: Питер, 2007. — 816 с.
8. Асратян Р.Э. Интернет-служба для поддержки распределенных вычислений // Информационные технологии. — 2006. — № 12. — С. 60–66.
9. Снейдер Й. Эффективное программирование TCP/IP. Библиотека программиста. — СПб.: Символ-Плюс, 2002. — 320 с.

Статья представлена к публикации руководителем РРС В.Ю. Столбовым.

Асратян Рубен Эзрасович — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ rea@ipu.ru.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2015 г.

Абрамянц Т.Г., Галяев А.А., Маслов Е.П. и др. Уклонение подвижного объекта в конфликтной среде от обнаружения системой разнородных наблюдателей. — № 2. — С. 31—37.

Алескеров Ф.Т., Белоусова В.Ю., Петрущенко В.В. Модели оболочечного анализа данных и анализа стохастической границы в задаче оценки эффективности деятельности университетов. — № 5. — С. 2—19.

Андреев К.В. Оптимальные траектории беспилотного летательного аппарата при слежении за подвижной целью с помощью антенной решетки. — № 5. — С. 76—83.

Асратян Р.Э. Организация конвейерной программной обработки в мультисерверной сетевой среде. — № 6. — С. 76—81.

Афанасьев В.Н. Алгоритмический метод построения управлений нелинейным неопределенным объектом. — № 3. — С. 12—19.

Баженов С.Г., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Управление траекторией и скоростью самолета при заходе на посадку в условиях пересеченной местности. — № 2. — С. 45—51.

Богомолова И.С., Гриненко С.В., Задорожная Е.К. Индекс человеческого развития и гендерное равенство: взаимообусловленность показателей. — № 1. — С. 38—46.

Бреер В.В., Мирзоян Г.Л., Новиков Д.А. Инновационная олигополия Курно. — № 5. — С. 45—57.

Будынков А.Н., Масолкин С.И. Проблема выбора ядра в одноклассовом методе опорных векторов. — № 6. — С. 70—75.

Вовенко Т.А., Волковицкий А.К., Павлов Б.В. и др. Модели и структура бортовых измерений пространственных физических полей. — № 3. — С. 59—68.

Гераськин М.И., Манахов В.В. Оптимизация взаимодействий в мультиагентной сильносвязанной системе «ритейлер — банк — страховщик». — № 4. — С. 9—18.

Гераськин М.И., Чхартишвили А.Г. Моделирование структур рынка олигополии при нелинейных функциях спроса и издержек агентов. — № 6. — С. 10—22.

Глумов В.М., Пучков А.М., Селезнев А.Е. Синтез и анализ алгоритмов управления боковым движением беспилотного летательного аппарата с двумя управляющими поверхностями. — № 3. — С. 69—78.

Горбанева О.И., Угольницкий Г.А., Усов А.Б. Модели коррупции в иерархических системах управления. — № 1. — С. 2—10.

Горошко И.В., Бондаренко Ю.В. Согласование социальных и экономических показателей развития региона: понятие и механизмы. — № 1. — С. 63—72.

Гранин С.С., Мандель А.С. Стационарные стратегии управления запасами в системах снабжения в условиях инфляции. — № 4. — С. 19—24.

Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Система экспертного оценивания состояния навигационной безопасности морской акватории на основе нейро-нечеткой сети. — № 4. — С. 58—65.

Дартау Л.А. Государственное управление здоровьем и качеством жизни. Ч. 1. Объект, субъекты, обязанности и ответственность. — № 2. — С. 52—59.

Дартау Л.А. Государственное управление здоровьем и качеством жизни. Ч. 2. Организационно-правовая технология. — № 3. — С. 40—48.

XXII Международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». — № 3. — С. 75—78.

Еделев А.В., Сендеров С.М., Пяткова Н.И. Разработка системы для исследований развития энергетики страны с учетом требований энергетической безопасности с помощью геоинформационных технологий. — № 2. — С. 68—74.

Еналеев А.К. Оптимальный согласованный механизм в системе с несколькими активными элементами. — № 3. — С. 20—28.

Зверев О.В., Хаметов В.М. Квантильное хеджирование опционов европейского типа на неполных рынках без трения. Ч. 2. Минимаксное хеджирование. — № 1. — С. 47—52.

Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г. Элементы формализации эволюционного процесса совершенствования сложных динамических систем путем нововведений и контроля надежности. — № 4. — С. 41—50.

Идентификация систем на пути создания общей теории идентификации объектов управления. — № 3. — С. 79—83.

Кадырова А.Р. Текучесть кадров: обзор проблемы. Ч. 1. Экономико-математические модели текучести высшего руководства. — № 2. — С. 2—12.

Кадырова А.Р. Текучесть кадров: обзор экономико-математических методов исследования проблемы.



Ч. 2. Модели текучести неруководящих сотрудников. — № 3. — С. 2—11.

Касаткина Е.В., Вавилова Д.Д. Информационно-аналитическая система прогнозирования обобщающих показателей социально-экономического развития региона. — № 4. — С. 25—34.

Кедрин В.С., Кузьмин О.В. Рекуррентные соотношения аддитивных последовательностей для периодических функций. — № 2. — С. 24—30.

Климовицкий М.Д., Ларин А.А. Адаптивная система управления термической обработкой ТРИП-сталей. — № 4. — С. 51—57.

Кожевников А.В., Кочнева Т.Н., Кочнев Н.В. Модальное управление с автонастройкой регулятора в линеаризованных двухмассовых электромеханических системах. — № 6. — С. 2—9.

Корепанов В.О., Новиков Д.А. Модели стратегического поведения в задаче о диффузной бомбе. — № 2. — С. 38—44.

Коротин В.Ю., Ульченков А.М., Исламов Р.Т. Риск-ориентированное управление стоимостью нефтяной компании в условиях неопределенности цен на нефть. — № 6. — С. 46—52.

Краснова С.А., Уткин А.В. Сигма-функция в задачах синтеза наблюдателей состояний и возмущений. — № 5. — С. 27—36.

Кривошеев О.И. Поиск оптимального кредитного рычага в условиях максимизации ожидаемой скорости роста стоимости портфеля. — № 6. — С. 35—45.

Марданов М.Дж., Рзаев Р.Р., Джамалов З.Р., Гасанов В.И. Подход к оценке конкурентоспособности высших учебных заведений. — № 6. — С. 23—34.

Маслак А.А., Моисеев С.И., Осипов С.А. Сравнительный анализ оценок параметров модели Раша, полученных методами максимального правдоподобия и наименьших квадратов. — № 5. — С. 58—66.

Масталиев Р.О. Необходимые условия оптимальности особых управлений в задаче оптимального управления дискретно-непрерывной системой. — № 1. — С. 11—18.

Миронов А.М., Михеев А.Г., Пятецкий В.Е. Алгоритм проверки ограниченности числа точек управления в экземпляре бизнес-процесса. — № 1. — С. 30—37.

Новиков Д.А. Модели информационного противоборства в управлении толпой. — № 3. — С. 29—29.

Подлазов В.С. Расширенное мультикольцо с диаметром 2. — № 4. — С. 35—40.

Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных

систем управления подвижными объектами. — № 4. — С. 66—74.

Рагимов А.Б. Решение задач оптимального управления при кусочно-постоянных, кусочно-линейных и кусочно-заданных на классе функций управляющих воздействиях. — № 2. — С. 13—23.

Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Кушников В.А. и др. Методы прогнозной оценки социально-экономических показателей национальной безопасности. — № 5. — С. 37—44.

Ростова Е.П. Модель стимулирования при управлении рисками в системе промышленных предприятий. — № 1. — С. 73—80.

Руденко З.Г. Нелинейная задача оптимизации портфеля взаимозависимых инвестиционных проектов. — № 5. — С. 67—70.

Сизых Д.С., Сизых Н.В. Методы экспресс-оценки финансового состояния компании по матричному балансу. Ч. 1. Модель матричного баланса. — № 2. — С. 60—67.

Сизых Д.С., Сизых Н.В. Методы экспресс-оценки финансового состояния компании по матричному балансу. Ч. 2. Методы оценки абсолютных показателей. — № 3. — С. 49—58.

Соколов Н.Л., Захаров П.А. Информационно-аналитическое обеспечение систем управления космическими аппаратами. — № 6. — С. 62—69.

Соломатин А.Н., Хачатуров В.Р. Стратегический контроль реализации стратегий регионального развития. — № 6. — С. 53—61.

Спирина В.С. Постановка задачи управления объектами коммерческой недвижимости с учетом потребительских предпочтений. — № 1. — С. 81—86.

Цыкунов А.М. Система слежения для объекта с распределенным запаздыванием в условиях возмущений и помех. — № 5. — С. 20—26.

Шатов Д.В. Идентификация запаздывания одномерных линейных объектов конечно-частотным методом. — № 4. — С. 2—8.

Шматов Г.А. Методы управления рисками размещения рекламы в СМИ. — № 5. — С. 71—75.

Щербатов И.А. Распределение локальных целей в компонентных структурах сложных слабоформализуемых систем. — № 1. — С. 19—29.

Яндыбаева Н.В., Кушников В.А. Математические модели, алгоритмы и комплексы программ для мониторинга эффективности образовательной деятельности вуза. — № 1. — С. 53—62.

CONTENTS & ABSTRACTS

MODAL CONTROL WITH CONTROLLER AUTO-TUNING IN LINEARIZED TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS 2

Kozhevnikov A.V., Kochneva T.N., Kochnev N.N.

The article presents a control system mathematical model for linearized two-mass electromechanical system with a modal controller. Quality indicators of transient processes in the control system are analyzed in comparison with characteristics of subordinate regulation structures. Shown is a high efficiency of electric drives with non-rigid mechanics modal control compared to traditional controllers and control methods. Considered are methods of system modal regulator auto-tuning, demonstrating the higher efficiency of the direct pattern search matching method against genetic algorithm of controller auto-tuning.

Keywords: modal control, electromechanical system, controller auto-tuning, genetic algorithm, direct search method.

THE SIMULATION OF OLIGOPOLY MARKET STRUCTURES FOR NONLINEAR DEMAND AND AGENTS' COSTS FUNCTIONS 10

Geraskin M.I., Chkhartishvili A.G.

The problem of oligopoly market structures simulation is considered for arbitrary number of agents, linear and nonlinear demand functions, nonlinear agents' costs functions. The equilibrium behavior of agents is described on the basis of conjectural variations in Cournot and Stackelberg reaction models (considering cases with one or several leaders). The adequacy of Cournot reaction model was proved by equilibriums simulation for Russia Volga region telecommunication market with statistically obtained prices and agents' costs functions for voice communication and internet traffic.

Keywords: oligopoly, nonlinear demand and costs functions, Nash equilibrium, Cournot reaction models, Stackelberg reaction models, telecommunication market.

AN APPROACH TO THE ASSESSMENT OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS COMPETITIVENESS 23

Mardanov M.D., Rzaev R.R., Jamalov Z.R., Hasanov V.I.

A method based on fuzzy inference is proposed for assessing the higher education institutions competitiveness and their subsequent ranking. Higher education institution competitiveness assessment includes multi-criteria assessments of its' competitive position in the educational services market and of a marketing environment in the whole. The proposed approach was tested on a set of hypothetical higher education institutions differing by arbitrarily chosen endogenous and exogenous characteristics.

Keywords: competitiveness of the university, marketing space, educational services, fuzzy set, fuzzy conclusion.

CREDIT LEVERAGE OPTIMIZATION MAXIMIZING EXPECTED RATE OF PORTFOLIO VALUE INCREASE. . . 35

Krivosheev O.V.

Considered is a control problem of Markowitz investment portfolio, which is subjected to independent stochastic increments of price logarithm, described by Wiener process with a drift and cash used as the risk free asset. An expression of optimal credit leverage is obtained. Optimal time or a leverage correction threshold is derived under the circumstances of positive transactional costs. Equilibrium asset return and leverage are found under conditions of leveling the equity capital profitability in all markets. The same approach can be adapted to real sector enterprises.

Keywords: CAPM, Wiener process, assets, credit leverage, portfolio, shares, random walks, rate of return.

OIL COMPANY VALUE RISK-BASED MANAGEMENT UNDER OIL PRICE UNCERTAINTY 46

Korotin V.Y., Ulchenkov A.M., Islamov R.T.

Considered is a debt structure optimization problem to maximize oil company value under oil price uncertainty, based on quantile cri-

teria. Suggested is a guaranteeing (by probability) solution search algorithm, giving a solution that maximizes the company value.

Keywords: quantile optimization, stochastic optimization, uncertainty analysis, risk-management.

STRATEGIC CONTROL OF REGIONAL DEVELOPMENT STRATEGY IMPLEMENTATION 53

Solomatin A.N., Khachaturov V.R.

Considered is a specificity of strategic control as of a final stage of region strategic management process. As particular cases of a general model of dynamic non-stationary system, system models for various ways of management are studied. Techniques of deviations monitoring, environment indignations monitoring, and crisis situations monitoring are suggested, as well as the integrated algorithm of strategy realization monitoring, uniting these techniques for practical application. Dynamic design application to adjustment and adaptation of regional development strategy is considered.

Keywords: strategic management of the region, strategic control, monitoring of strategy realization, adaptation of strategy.

THE INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT OF AUTONOMOUS SPACECRAFT CONTROL SYSTEMS . 62

Sokolov N.L., Zakharov P.A.

Considered are the questions of building and developing the information and analytical maintenance of autonomous decision support systems for the spacecraft control. The presented system structure, alongside with the traditional units — the knowledge base and the inference engine, contains new elements: the unit of spacecraft equipment state simulation and prediction, and the unit of flight situations identification. The formal problem statement of the autonomous spacecraft control is given. General principles of system structural elements' interaction during autonomous decision-making are developed. Given are examples of control systems information and analytical support usage to cope the occurring contingencies.

Keywords: autonomous system, control, spacecraft, the knowledge base, the inference engine, identification, contingency, simulation, forecasting, state, onboard equipment, decision-making.

THE PROBLEM OF CHOOSING THE KERNEL FOR ONE-CLASS SUPPORT VECTOR MACHINES 70

Budynkov A.N., Masolkin S.I.

The article presents a review of one-class support vector machine (1-SVM) used when there is not enough data for abnormal technological object's behavior detection. Investigated are three procedures of the SVM's kernel parameter evaluation. Two of them are known in literature as the cross validation method and the maximum dispersion method, and the third one is an author-suggested modification of the maximum dispersion method, minimizing the kernel matrix's entropy. It is shown that for classification without counting training data set ejections the suggested procedure provides the classification's quality equal to the first one, and with less value of the kernel parameter.

Keywords: classification, SVM, kernel, entropy.

ORGANIZATION OF PIPELINE PROCESSING IN MULTI-SERVER NETWORK ENVIRONMENT 76

Asratian R.E.

The principles of the Internet service organization focused on a support of the distributed applications and systems are considered. The approach can be viewed as some kind of «network generalization» of the well known pipeline program mechanism, allowing to extend its application to multi-server environment. The main characteristic of the new service is the possibility of simultaneous start of several executable modules on various network nodes with providing data exchange channels between them.

Keywords: the distributed systems, Internet technologies, network interactions, pipeline processing.

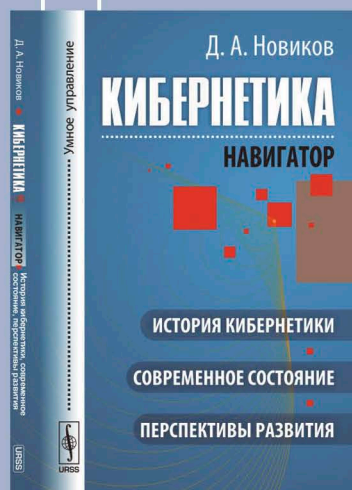
Index of papers published in 2015. 82

Лепский В.Е. **Эволюция представлений об управлении (методологический и философский анализ)** – М.: Когито-Центр, 2015. – 107 с. ISBN 978-5-89353-464-1.

Философско-методологический анализ эволюции представлений об управлении проведен в контексте развития научной рациональности (классическая, неклассическая, постнеклассическая). Рассмотрена смена базовых парадигм, объектов и видов управления. Обосновано повышение роли субъектов в управлении через смену подходов: деятельностный, субъектно-деятельностный, субъектно-ориентированный. Дальнейшее развитие проблематики управления связывается со становлением научного обеспечения постнеклассической рациональности.

Для специалистов из гуманитарных, естественно-научных и технических областей знаний, ориентированных на проблемы управления социальными системами, для студентов и аспирантов, а также для широкой аудитории управленцев-практиков.

Электронный вариант книги в свободном доступе на сайте <http://www.reflexion.ru/Library/Lepskiy2015.pdf>.



Новиков Д.А. **Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития.** – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 160 с. / Сер. «Умное управление. ISBN 978-5-9710-2549-8.

Книга является кратким «навигатором» по истории кибернетики, ее современному состоянию и перспективам развития.

Рассмотрены эволюция кибернетики (от Н. Винера до наших дней), причины ее взлетов и «падений». Описаны взаимосвязь кибернетики с философией и методологией управления, а также с теорией систем и системным анализом.

Проведен анализ современных трендов развития кибернетики. Вводится в рассмотрение новый этап развития кибернетики – «Кибернетика 2.0» как наука об (общих закономерностях) организации систем и управлении ими. Обосновывается актуальность развития

нового раздела кибернетики – «теории Организации» (или O^3), исследующей организацию как свойство, процесс и систему.

Для научных и практических работников, а также студентов, аспирантов и докторантов. В первую очередь – преподавателей вузов для использования при подготовке курсов лекций по кибернетике, теории управления, теории систем и системному анализу, современным концепциям естествознания.

Электронный вариант книги в свободном доступе на сайте проекта «Умное управление» www.mtas.ru/about/smartman.

